

FLORACIONES DE ALGAS EN EL EMBALSE SAN ROQUE (CÓRDOBA)

**María Inés Rodríguez¹, Fanny Busso², María Alejandra Bustamante¹,
Ana Laura Ruibal Conti¹, Marcia Ruiz¹ & Carlos Martín Angelaccio¹**

¹Centro de la Región Semiárida (CIRSA) - Instituto Nacional del Agua (INA)

Ambrosio Olmos 1142- X5000JGT- Córdoba- Argentina-Te: 0351-4683015

E-mail: minesrodrig@infovia.com.ar

²Aguas Cordobesas

RESUMEN

La caracterización trófica del Embalse San Roque permite categorizar al mismo en la actualidad como eutrófico, presentando un desarrollo frecuente de floraciones algales. Estas floraciones son principalmente de *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena spiroides*, *Ceratium hirundinella*, *Cyclotella sp* y más recientemente de la clorófito *Carterias sp*.

La concentración excesiva de nutrientes de N y P presentes en el sistema permiten inferir que éstos rara vez son factores limitantes del crecimiento algal, por lo que otros factores tales como el nivel del embalse, condiciones térmicas y lumínicas, podrían controlar significativamente los cambios en la composición y abundancia del fitoplancton.

Se analiza la información correspondiente al período 1999-2003 teniendo en cuenta las condiciones de temperatura del agua, grado de estratificación y nivel del embalse en las cuales se desarrollan las floraciones de las algas mencionadas y se asocia a estos eventos una probabilidad empírica de ocurrencia. Se observó que la combinación de situaciones de baja en el nivel de embalse con altas temperaturas independientemente de su gradiente vertical, son condiciones aptas para el desarrollo de floraciones de cianófitas. Por otro lado altos niveles del embalse con un marcado grado de estratificación favorecen las floraciones de *C. hirundinella*.

Esta información es de utilidad a fin de poder pronosticar el desarrollo de las mismas, anticipando la implementación de medidas de manejo relacionadas con los distintos usos de sus aguas.

Palabras clave: eutroficación, floraciones algales, estratificación, nivel de embalse.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el interés por la ecología del fitoplancton presente en lagos y embalses se ha incrementado significativamente. Esto se debe a que los problemas asociados a su desarrollo excesivo, particularmente de determinadas especies de algas, pueden limitar el uso recreativo de un cuerpo de agua, afectar su calidad estética y en caso de ser fuente de abastecimiento, también puede provocar inconvenientes en el proceso de potabilización.

La problemática de eutroficación está definida por la excesiva cantidad de nutrientes presente en el sistema en particular de nitrógeno y fósforo. El desarrollo de floraciones algales en lagos y embalses, es uno de los principales efectos de esta problemática. El grado en que la calidad de las aguas es afectada por el crecimiento de fitoplancton, depende de numerosos factores entre ellos: la composición de la comunidad fitoplanctónica, la concentración de nutrientes en el sistema, la morfología del cuerpo de agua y el tiempo de residencia hidráulico, por mencionar algunos aspectos (Wetzel, 1981).

El embalse San Roque, principal fuente de provisión de agua para una población de más de 1 millón de habitantes, presenta un avanzado estado de eutrofia (Gavilán, 1981; Rodríguez et al, 2000; Granero et al, 2002 y Bustamante et al, 2002). Las algas causantes de floraciones en este cuerpo de agua son principalmente cianófitas de las especies *Anabaena spiroides* y *Microcystis aeruginosa*, y la pirrófita *Ceratium hirundinella* (Bonetto et al, 1976; Pizzolón, 1997 y Ruibal et al, 1999). La presencia de cianófitas de los géneros mencionados adquiere particular importancia ya que son algas potencialmente productoras de toxinas. En ocasiones, las floraciones de *M. aeruginosa* y *A. spiroides* desarrolladas en el Embalse San Roque han sido tóxicas (Scarafia et al 1995 y Ruibal, 2003).

Por otro lado, *C. hirundinella* ha causado problemas en el proceso de potabilización debido a la producción de olor y sabor en el agua y al taponamiento de los filtros (Ruibal et al, 1999). Si bien la presencia de *C. hirundinella* suele asociarse a condiciones de meso a eutrofia (Rosén, 1981), existen registros de floraciones de esta especie en embalses hipereutróficos (van Ginkel et al, 2001).

Existen numerosos estudios que describen las condiciones ambientales que favorecen el desarrollo de las especies de algas mencionadas (Harris et al 1979; van Ginkel et al, 2001 y Pérez-Martínez y Sánchez-Castillo, 2002), sin embargo, la variabilidad de las condiciones climáticas como así también las características propias del cuerpo de agua, hacen que los resultados no sean siempre extrapolables. Desde este punto de vista, el conocimiento de las condiciones locales bajo las cuales se producen estos eventos de floración, puede aportar información útil para la aplicación de medidas de control de la eutroficación.

Los objetivos del presente trabajo fueron analizar la distribución y abundancia de los principales géneros de algas en el embalse San Roque, conjuntamente a factores físicos como temperatura, grado de estratificación y nivel del embalse asociados a sus mayores desarrollos y estudiar la probabilidad de ocurrencia de floraciones algales.

AREA DE ESTUDIO

El Embalse San Roque (31° 22' S y 64° 27' O) se localiza en el Valle de Punilla a 608 m.s.n.m. en la Provincia de Córdoba, Argentina. El clima de la región es templado con una temperatura media anual de 14° C y vientos predominantes del cuadrante sur y norte, con precipitaciones estivales en el rango de 400 a 1000 mm y una media anual aproximadamente de 720 mm.

A nivel de cota de vertedero (35,3 m), la superficie del embalse es de 15 km², con 201 hm³ de volumen y una profundidad media de 13,4 m. El tiempo de residencia medio aproximado es de 0,6 años. La cuenca de drenaje es de 1750 km².

En relación a la dinámica térmica, el embalse posee un régimen monomítico (López et al, 1997; Helmbrecht y López, 2000 y Morillo, 2002).

El embalse cumple principalmente la función de provisión de agua a la segunda ciudad del país (Córdoba), de control de inundaciones aprovechamiento hidroeléctrico y es a su vez, un ámbito en el que se desarrollan múltiples actividades recreativas.

PLAN DE MONITOREO Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El diseño de monitoreo comprende la medición de parámetros *in situ* y la toma de muestras de agua en seis puntos del embalse. La ubicación de los distintos puntos se muestra en la Figura 1.

En todos los sitios, se tomaron lecturas en el perfil de la columna de agua cada un metro de temperatura (°C) del agua con una sonda (Horiba U-23). La transparencia se evaluó a través del disco de Secchi (m). Las muestras de agua fueron tomadas en el centro y garganta a nivel subsuperficial (0,20 m) y en la zona fótica (1,7 x transparencia de Secchi) con una botella de tipo Van Dorn, mientras que en las desembocaduras las muestras fueron sólo subsuperficiales. Analíticamente en laboratorio se midieron las concentraciones de fósforo total (PT, µg/l) por digestión con persulfato y reducción con ácido ascórbico, fósforo reactivo soluble (PRS, µg/l) por reducción con ácido ascórbico, nitrógeno de amonio (N-NH₄⁺, µg/l) por el método de la sal del fenol, nitrógeno de nitrito (N-NO₂⁻, µg/l) por el método de diazotación y nitrógeno de nitratos (N-NO₃⁻, µg/l) mediante columna de cadmio. Los análisis de laboratorio incluyen además, clorofila *a* (µg/l) por espectrofotometría y recuento de algas en filtro e identificación (org/l) (APHA, 1999). Se consideraron también las mediciones diarias del nivel de cota relativa (m) del embalse.

El período de análisis, con 57 campañas, abarca desde el 29/9/1999 al 22/4/2003. La frecuencia de muestreo durante el período estival 1999-2000 fue semanal y posteriormente quincenal, mientras que para el año 2001, 2002 y 2003 la frecuencia fue mensual. El número de registros en embalse fueron 327 subsuperficiales y a profundidad de zona fótica 141, sumando un total de 468.

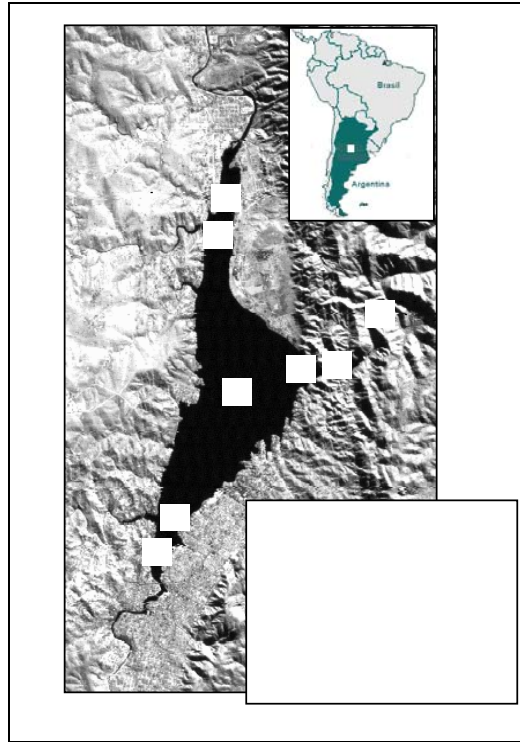


Figura 1: Ubicación de la cuenca del Embalse San Roque y localización de los puntos de monitoreo.

El grado de estratificación fue medido como la diferencia entre la temperatura superficial y a un metro del fondo (Straskraba et al, 1993).

Se analizó la composición, frecuencia y abundancia de los géneros presentes en el embalse. Se utilizó análisis de correlación y gráficos de dispersión para visualizar las asociaciones entre las variables físico-químicas y biológicas.

Para detectar cuáles son las condiciones bajo las cuales se producen las floraciones se analizó su frecuencia en los distintos rangos de condiciones para las variables más influyentes.

En función de los datos medidos, se obtuvo una frecuencia empírica de eventos de floración de las principales especies teniendo en cuenta el grado de estratificación y el nivel del embalse.

RESULTADOS Y DISCUSION

NUTRIENTES

Las concentraciones de nutrientes de P y N en el embalse usualmente son altas. Esto se debe a la carga proveniente de diversas fuentes puntuales presentes en la cuenca y márgenes del embalse que no poseen un tratamiento adecuado (Bustamante et al, 2001). El valor de mediana anual de NIT se mantuvo mayor a 300 $\mu\text{g/l}$, para el PRS mayor a 15 $\mu\text{g/l}$ y para el PT mayor a 50 $\mu\text{g/l}$. Ambos nutrientes se hallaron en la mayoría de las ocasiones por encima de los valores absolutos de 5 $\mu\text{g/l}$ para el PRS y de 20 $\mu\text{g/l}$ para el NIT, de limitación para el desarrollo de las algas (Ryding y Rast, 1992). De allí la importancia de considerar otros factores que pueden influir en las variaciones de la composición de la comunidad fitoplanctónica y en el desarrollo de floraciones.

ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA Y NIVEL DEL EMBALSE

Las variaciones cíclicas anuales e interanuales de las condiciones físicas del embalse tienen efectos en la dinámica y estructura de la comunidad de algas.

Por un lado, la concentración de nutrientes disponibles para las algas en el embalse, cambia al incrementarse o disminuir el nivel de sus aguas como consecuencia del mayor o menor aporte de los tributarios y efectos de dilución (Bustamante et al, 2001). Este hecho se refleja en la relación mostrada en la Figura 2, donde las mayores concentraciones de PT corresponden a mayores niveles de embalse, cercanos al nivel de evacuación. Por otra parte, el tiempo de residencia hidráulico, que en el embalse San Roque disminuye significativamente en el período estival, disminuye en general la permanencia en el lago tanto de las algas como de los nutrientes (Jorgensen, 2003).

La Figura 3 muestra la variación diaria en el nivel del embalse para el período enero 1996 - abril 2003, donde los diversos picos se corresponden con la temporada de lluvias de primavera y verano. Puede observarse que el período 1999-2000 presentó comparativamente con otros años, mayores niveles de cota y una mayor frecuencia de evacuación por vertedero. Bajo estas condiciones aparece *C. hirundinella*, especie nunca antes registrada en este embalse.

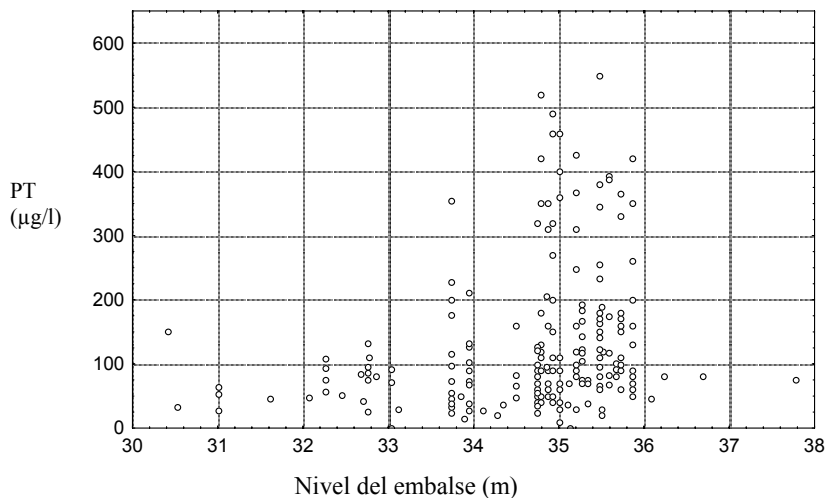


Figura 2: PT correspondiente a las muestras subsuperficiales de todo el embalse

Nivel del embalse (m)

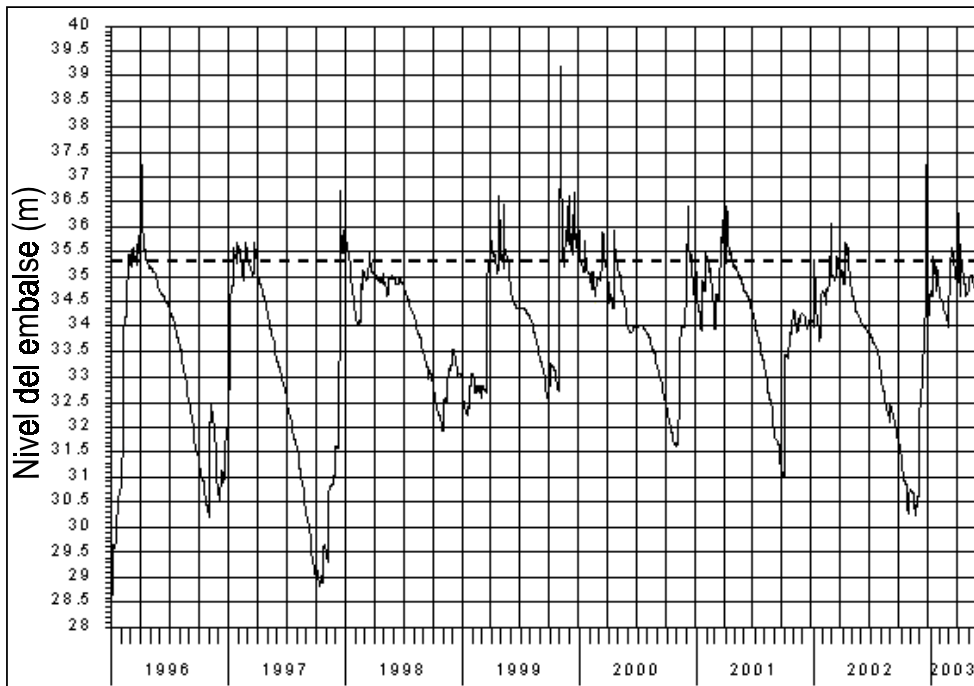


Figura 3: Variación diaria del nivel del embalse. En línea de puntos se señala el nivel de vertedero.

La dinámica de estratificación térmica es otro de los factores de relevancia que acompaña a la variación en la composición de la comunidad de algas en el embalse. Los movimientos del agua no sólo son importantes en cuanto al movimiento físico dentro de la zona fótica, sino que son decisivos en el transporte vertical de materia mineralizada a partir de zonas profundas y en mantener a las algas dentro de la zona eufótica. Su sedimentación fuera de la zona fótica es un inconveniente que puede ser compensado por el movimiento y transporte debido a la turbulencia del agua o por propia motilidad (Margalef, 1983).

La Figura 4 muestra la variación de la diferencia entre la temperatura de superficie y a 1 metro del fondo. Se observa que el período de estratificación (diferencia > 2) se puede extender de septiembre a marzo (primavera, verano e inicios del otoño).

La presencia de termoclina es de vital importancia, ya que actúa aumentando el tiempo de residencia de la masa de agua y con ella la de nutrientes y riesgos de floraciones algales (Jorgensen, 2003).

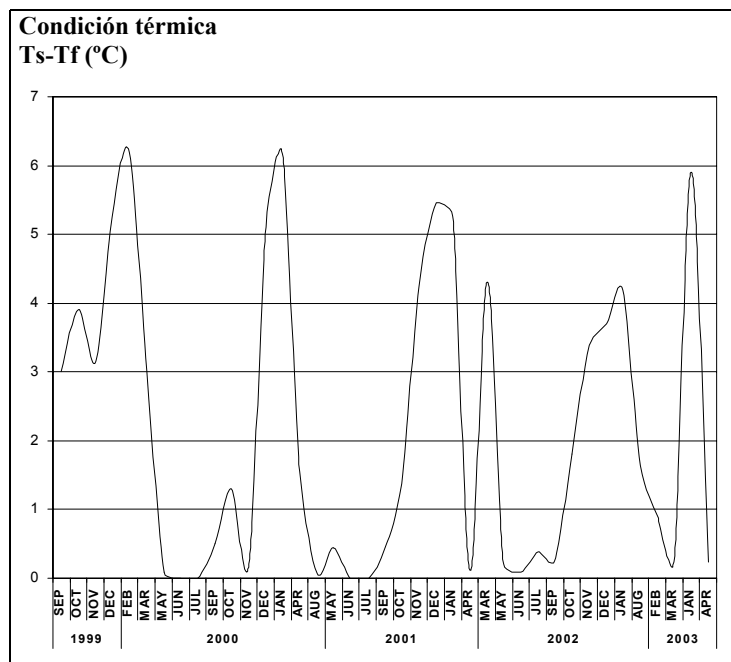


Figura 4: Dinámica de estratificación térmica representada por la variación en el tiempo de Ts-Tf en el centro del embalse (profundidad media = 16 m).

COMPOSICIÓN DEL FITOPLANCTON

La Figura 5 muestra los 39 géneros de algas presentes y su frecuencia de aparición. Entre las algas más comúnmente registradas se hallan *Cyclotella* sp, *C. hirundinella*, *Aulacoseira* sp, *A. spiroides*, *Melosira* sp, *M. aeruginosa*, *Navicula* sp, *Closterium* sp y *Stephanodiscus* sp.

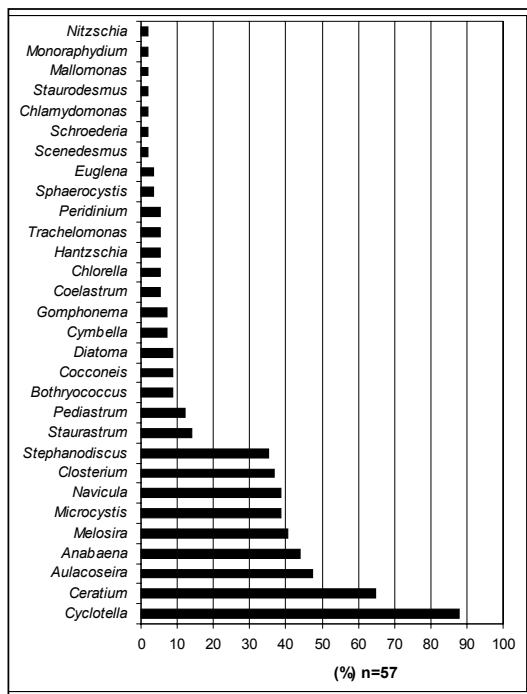


Figura 5: Frecuencia de géneros del Embalse San Roque. Muestras subsuperficiales del centro.

De estos géneros, *Cyclotella sp*, *Ceratium sp*, *Anabaena sp*, *Microcystis sp* y *Closterium sp* han desarrollado floraciones en el embalse San Roque.

El término floración no está definido de modo preciso, pero comúnmente se refiere a la ocurrencia de un número excesivo de algas (por ejemplo $> 5 \times 10^6$ cél/l) y una coloración observable en el agua (Henderson-Sellers y Markland, 1987). Indirectamente, la estimación de la biomasa producida se efectúa a través de la medición de clorofila a. Valores críticos de este pigmento se consideran alrededor de $10 \mu\text{g/l}$ (Ryding y Rast, 1992). La Figura 6 muestra la variación temporal en la abundancia de las algas mencionadas, considerando los datos subsuperficiales del centro del embalse ($n=57$). Se observa que los picos invernales de *Cyclotella sp* alternan con floraciones estivales ya sea de *C. hirundinella* o de cianófitas (*M. aeruginosa* y *A. spiroides*). En tanto que el mayor desarrollo de la clorófita *Closterium sp* ha sido detectado en primavera.

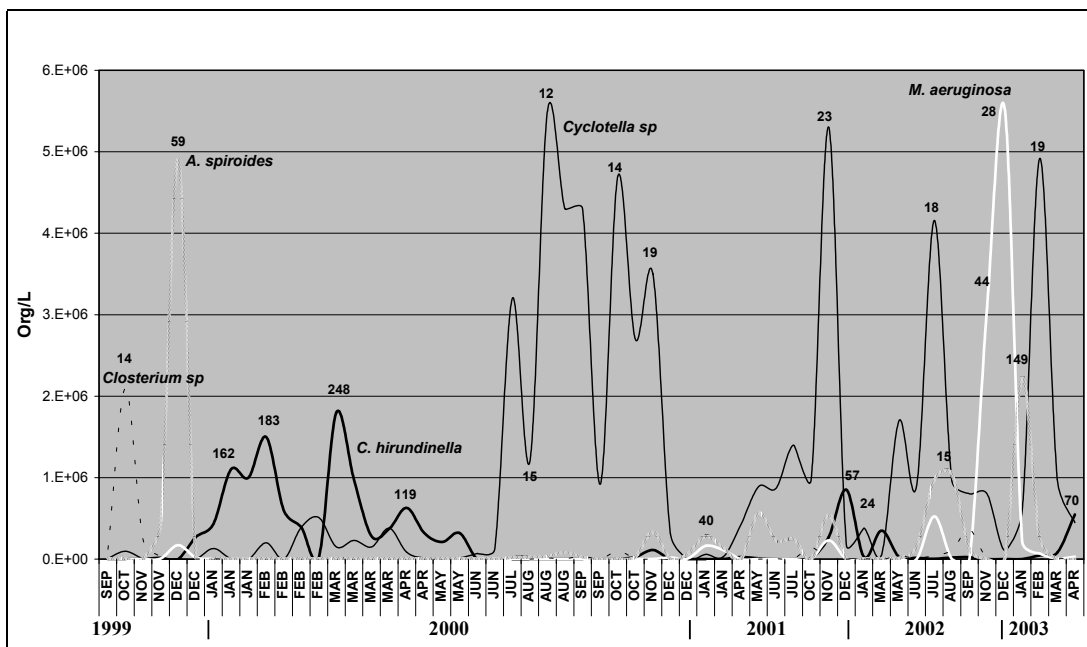


Figura 6: Variación temporal subsuperficial de los géneros más abundantes en el centro del embalse. Los valores indican la concentración de Cl a ($\mu\text{g/l}$).

Por otro lado, si consideramos el número total de registros en el embalse ($n=468$), se detectan 273 eventos con una alta abundancia de algas (mayor a 10^6 org/l) y elevada concentración de Cl a (mayor a $10 \mu\text{g/l}$), en los que intervienen *Cyclotella sp* (47%), *M. aeruginosa* (40%), *A. spiroides* (28%), *C. hirundinella* (21%), *Melosira sp* (4%), *Closterium sp* (3%), y *Chlorella sp*, *Aulacoseira sp* y *Stephanodiscus sp* (1%).

FLORACIONES DE *Cyclotella sp*

La Figura 7 muestra la relación entre la abundancia de estas algas y la concentración de Cl a, las muestras corresponden al nivel subsuperficial de todo el embalse con un porcentaje de dominancia de *Cyclotella sp* superior al 90%. Debido al pequeño tamaño de sus células, se requiere un alto número de ellas ($> 2.10^6$ de org/l) para que la concentración de este pigmento pueda superar el valor crítico de $10 \mu\text{g/l}$. La presencia de estas algas no es claramente detectable a campo pero en gran cantidad, tornan al agua de un color marrón amarillento. La Figura 8 muestra la relación de la abundancia de *Cyclotella sp* con la transparencia. Superando los valores de 2.10^6 org/l, la visibilidad

del disco de Secchi puede ser menor a 1 m. Una transparencia mínima de 0,48 m se alcanzó con un valor extremo de $4 \cdot 10^7$ de org/l en el área de desembocadura del Río San Antonio. El valor de *Cl a* fue de 51 $\mu\text{g/l}$, siendo un 98% de las algas de esta muestra correspondientes a *Cyclotella sp.*

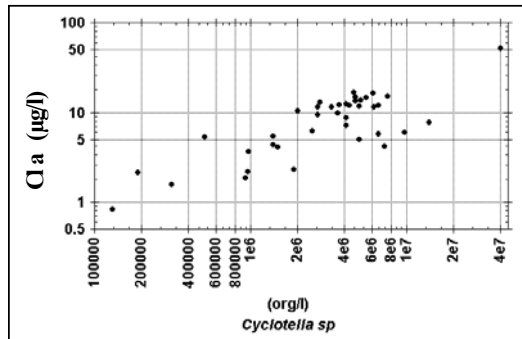


Figura 7: Dispersión *Cl a* vs abundancia de *Cyclotella sp.*

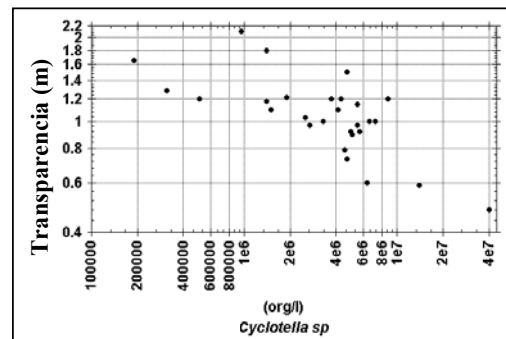


Figura 8: Dispersión transparencia vs abundancia de *Cyclotella sp.*

Para detectar cuáles son las condiciones de temperatura, nivel de embalse, grado de estratificación y PT bajo las cuales se produce una alta abundancia de *Cyclotella sp.*, se analiza su frecuencia de aparición en todos los sectores del embalse, en los distintos rangos de las variables mencionadas. Se observó que la mayor frecuencia de mayor abundancia corresponden a temperaturas iguales o menores a 12°C , cotas de embalse entre 33 y 34 y condiciones de mezcla ($T_s - T_f \leq 1$). También se ha registrado una disminución en la abundancia de *Cyclotella sp.* conforme aumenta la estratificación. El valor de correlación obtenido entre estas dos variables fue inverso ($r = -0,415^{**}$).

Bajo condiciones de mezcla del embalse, típicas a finales del otoño, en el invierno y a inicios de la primavera, *Cyclotella sp.* está presente la mayoría de las veces. En breves períodos de mezcla en primavera y verano, provocados por vientos intensos, se ha registrado un rápido desarrollo de esta diatomea.

La mezcla extensa de la columna de agua favorece la dominancia de las diatomeas que poseen una alta tasa reproductiva, ya que les permite conseguir la luz y nutrientes necesarios para su desarrollo. Mientras que bajo condiciones de estratificación, su mayor densidad específica sumada a la carencia de medios móviles, determinan su hundimiento más allá de la zona eufótica (Dokulil, 1984).

La mayor abundancia de *Cyclotella sp.* se presenta usualmente con concentraciones de PT entre 30 y 75 $\mu\text{g/l}$.

FLORACIONES DE *C. hirundinella*

La Figura 9 muestra la relación entre la cantidad de *C. hirundinella* y la concentración de *Cl a*. El número máximo de org/l detectado fue de $5,8 \cdot 10^6$ con una concentración de clorofila *a* de 810 $\mu\text{g/l}$. Bajo estas condiciones el agua adquiere una coloración de marrón rojiza a marrón oscura y la visibilidad del disco de Secchi es mínima (0,38 m). La Figura 10 muestra la relación entre este último parámetro y la abundancia de *C. hirundinella*. Cuando el número de algas aumenta por encima de 10^6 se produce una disminución importante en la transparencia (<1 m). Se ha observado que incluso con escasa presencia de *C. hirundinella* (300 mil org/l) el agua puede presentar una coloración amarronada. Esto se debe a que la contribución de este organismo por unidad a la biomasa algal es alta debido a su gran tamaño (aproximadamente 230μ de largo), una abundancia de 200 mil org/l alcanzan para superar holgadamente los $10 \mu\text{g/l}$ de *Cl a*.

Históricamente, no existen registros de que *C. hirundinella* haya sido el alga dominante del verano en el Embalse San Roque, pero desde su aparición en el año 1999, se han observado episodios de floraciones en numerosas ocasiones. Las condiciones ambientales imperantes en aquél período fueron particulares si las comparamos con las condiciones de otros años. En relación a los aspectos físicos del sistema íntimamente relacionados con los factores climáticos, se observó un mayor volumen de agua embalsada en ese período, producto de las intensas lluvias registradas. Consecuentemente hubo también una mayor frecuencia y volumen evacuado por vertedero (Figura 4).

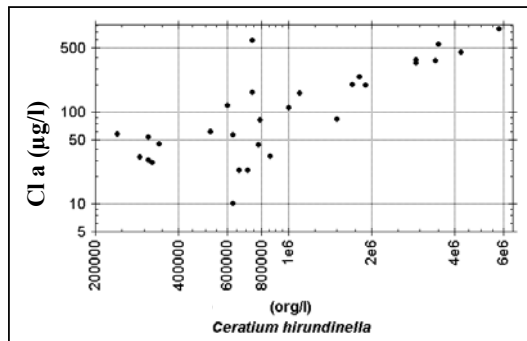


Figura 9: Dispersión *Cl a* vs abundancia de *C. hirundinella*.

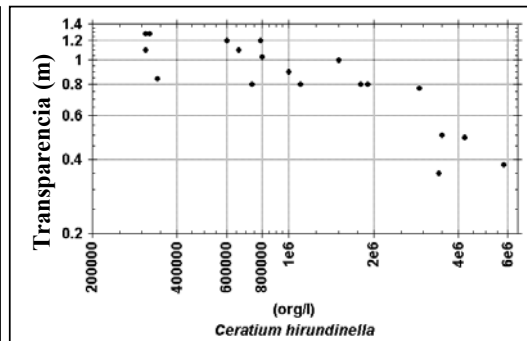


Figura 10: Dispersión transparencia vs abundancia de *C. hirundinella*.

C. hirundinella se halla presente con alta frecuencia entre los 15 y 26 $^{\circ}\text{C}$, y con mayor abundancia entre los 22 y 26 $^{\circ}\text{C}$, cuando el embalse presenta altos niveles de cota, entre 34 y 35 m.

En relación a la estratificación, *C. hirundinella* se adapta a un amplio rango de condiciones, pero la mayor frecuencia de eventos se observaron en el embalse bajo condiciones de estratificación, el valor de correlación obtenido fue de $0,570^{**}$.

Esta condición puede favorecer su desarrollo ya que al poseer flagelos, son competitivamente más eficaces en la búsqueda de luz y nutrientes que no están disponibles para otras algas (Margalef, 1983). Esta situación ha sido también descrita para embalses y lagos de regiones templadas (Reynolds, 1984). Por otro lado, máximos de *C. hirundinella* se han registrado bajo condiciones de mezcla en embalses subtropicales que se estratifican en verano sugiriéndose una dependencia de esta especie a la dinámica del oxígeno del hipolimnio y el régimen hídrico (Pérez Martínez y Sánchez Castillo, 2002).

La mayor abundancia de *C. hirundinella* se registra con concentraciones de PT por encima de $50 \mu\text{g/l}$.

FLORACIONES DE *Anabaena spiroides* y *Microcystis aeruginosa*

Para valores de abundancia de *A. spiroides* por encima de 10^6 de org/l y dominancia mayor a un 50 %, la concentración de clorofila *a* supera los 100 $\mu\text{g/l}$ (Figura 11), y a campo son visibles otorgando al cuerpo de agua una coloración verde. No se observa una asociación entre la transparencia y la abundancia de esta alga que se mantiene baja con escasa presencia de esta alga (Figura 12).

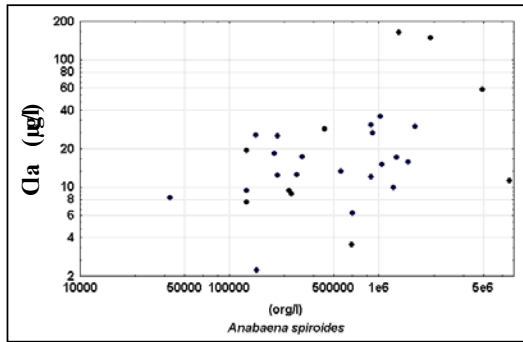


Figura 11: Dispersión Cl a vs abundancia de *Anabaena sp.*

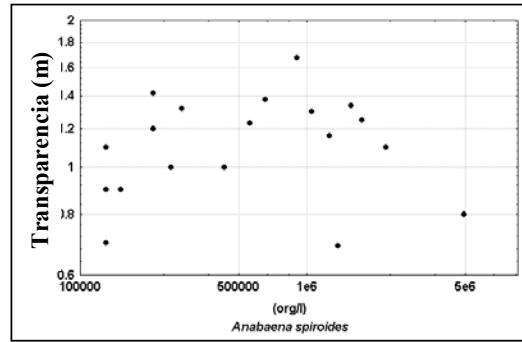


Figura 12: Dispersión Cl a vs abundancia de *Anabaena sp.*

El mayor número de registros de mayor abundancia de este género se encuentra a temperaturas entre 14 y 26 °C, cotas de embalse por debajo del vertedero (35,3 m), condiciones de estratificación y concentraciones de PT por encima de 20 $\mu\text{g/l}$.

Para *Microcystis aeruginosa* se observa que con valores por encima de $1 \cdot 10^6$ org/l y una dominancia mayor al 50%, la concentración de clorofila puede superar los 10 $\mu\text{g/l}$ (Figura 13), y a campo son visibles en forma de acúmulos de color verde intenso. La visibilidad del disco de Secchi no es afectada cuando aumenta la abundancia de esta algas debido al modo aglomerado en que se presentan estas algas (Figura 14).

Los eventos de floración para ambas especies de cianófitas, están conformado por un número muy alto de células, si se tiene en cuenta que un “organismo” de *A. spiroides* corresponde a un filamento de aproximadamente 9 células, mientras que para *M. aeruginosa* representa una colonia de aproximadamente 100 células.

Los valores máximos de abundancia para *M. aeruginosa*, se han registrado en primavera a temperaturas entre 11 y 26 °C, con el comienzo de estratificación, (valores menores a 5), cotas de embalse por debajo del vertedero y concentraciones de PT mayor 30 $\mu\text{g/l}$.

El grado de correlación entre la abundancia de ambos géneros y el grado de estratificación no es significativo. Esto sugiere que si bien la condición de estratificación favorece el desarrollo de estas algas, pueden desarrollarse en condiciones de mezcla contrarestando la turbulencia, siendo esta una de las principales características que otorga ventaja a las cianobacterias sobre otros grupos.

Lindenschmidt (1999) ha sugerido la existencia de una diferencia decisiva en la intensidad o en la frecuencia de la turbulencia las cuales favorecen el mayor desarrollo de *M. aeruginosa*.

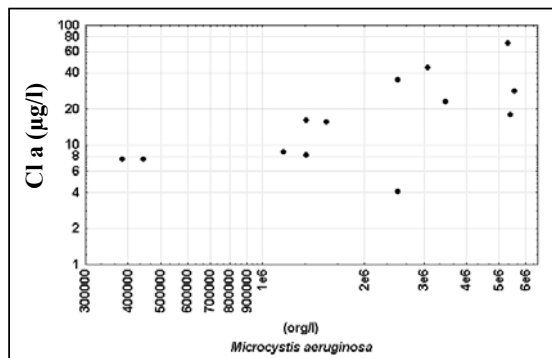


Figura 13: Dispersión Cl a vs abundancia de *Microcystis sp.*

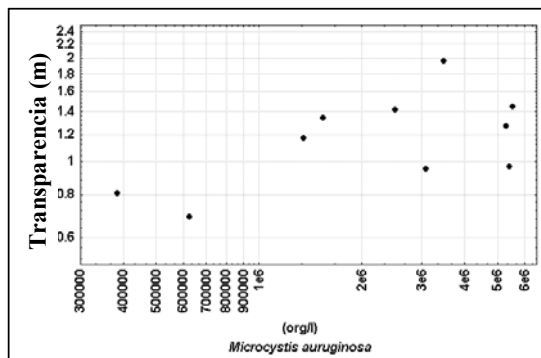


Figura 14: Dispersión transparencia vs abundancia de *Microcystis sp.*

Una síntesis de lo expuesto se muestra en la Tabla 1. En función de los rangos observados se calcula la frecuencia empírica de floración para cada especie en relación a la condición térmica y el nivel del embalse (Tabla 2) y se elabora un diagrama (Figura 15) de las condiciones físicas del embalse bajo las cuales se desarrollan más frecuentemente las floraciones.

Tabla 1: Rangos de condiciones ambientales que se desarrollan floraciones de los géneros más relevantes del Embalse San Roque.

	<i>Cyclotella sp</i>	<i>C. hirundinella</i>	<i>A. spiroides</i>	<i>M. aeruginosa</i>
Abundancia (org/l)	$2 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^7$	300 000- $5,8 \cdot 10^6$	$10^6 - 5 \cdot 10^6$	$10^6 - 5,5 \cdot 10^6$
Cl a (µg/l)	10-52	10-810	50-160	10-70
Transparencia (m)	0,5-1,5	0,3-1	0,6-1	0,9-2
Temperatura (° C)	<12	22-26	14-25	11-26
Estratificación (Ts-Tf)	<1	>2	0-4	0-5
Nivel del embalse (m)	<34	>34 y <35,3	<35,3	<35,30
Color del agua	Verde amarillento	Rojizo amarronado	Verde	Verde en acúmulos
PT (µg/l)	>30	>75	>20	>30
Dominancia (%)	>90	>90	>50	>50

Tabla 2: Probabilidades empíricas de floraciones (%) en función de la cota relativa y el grado de estratificación, tomando las condiciones de abundancia, Cl a y dominancia especificadas para cada especie en la Tabla 1. Cy: *Cyclotella sp*; Ce: *C. hirundinella*; My: *M. aeruginosa*; Ana: *A. spiroides*; Cl: *Closterium sp*, No: sin floración; en gris: condición del embalse no registrada.

		Condición térmica (Ts-Tf) °C								
		<1	>1	>2	>3	>4	>5	>6	>7	>8
Nivel del embalse (m)	≥36		No=100	An=100	No=100	An=34 No=66	No=100	No=100		No=100
	<35,3	No=25 Ce=25 Cy=12	Ce=75 CeCy=25	Ce=75	Ce=67 No=17	Ce=50 No=34	No=50 Ce=50	Ce=57 No=43	Ce=75 No=25	
	≥35	No=100	Ce=40 Cy=20 No=40	Ce=67 No=37	Ce=100	Ce=56 No=44	Ce=67 No=33	Ce=50 No=50	Ce=100	
	≥34	No=20 An=2 Ce=26 Cy=46 AnCy=4 CeMy=2	No=25 An=6 Ce=38 Cy=19 My=6 AnCy=6	Ce=40 Cy=20 My=40	No=36 Ce=43 Cy=14 My=7	No=13 An=13 Ce=33 Cy=20 My=7 AnCy=7 AnMy=7	No=41 An=6 Ce=47 AnMy=6	Ce=100	Ce=100	
	≥33	Cy=81 My=2 Ana=2 AnCy=2 AnCyMy=2 No=11	Cy=91 CyMy=9	AnMy=50 Cy=50	No=100	No=100	Cy=33 No=50 AnMy=17			No=100
	≥32	Cy=75 No=17 Cl=8	Cy=78 Ana=22	Cy=36 Cl=36 Ana=9 No=19	Cl=72 No=14 AnMy=14					
	>31		Cy=100	Ana=67 Cy=33						
	≤31		Ana=100		My=50 Ana=17 No=33					

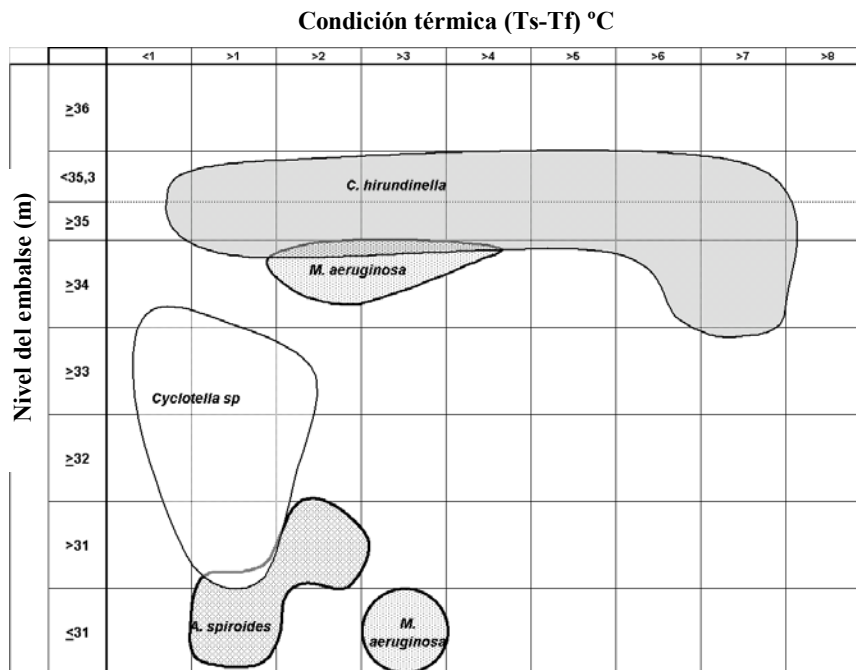


Figura 15: Diagrama basado en la Tabla 2 que representa la especie con mayor probabilidad de generar eventos de floración en función del nivel del embalse y grado de estratificación.

En este diagrama se observan dos sectores de solapamiento entre especies, uno entre *M. aeruginosa* y *C. hirundinella* y otro entre *A. spiroides* y *Cyclotella sp*. El primero se debe a que estas especies presentan una cierta similitud en las condiciones óptimas para su desarrollo. En numerosos lagos estas especies han sido observadas en forma conjunta o alternadamente como especies climax. El mayor desarrollo de *C. hirundinella* estaría dado por condiciones de mayor estabilidad de la columna de agua y mayores temperaturas (Lindenschmidt, 1999). Esta condición sumada a concentraciones de PT altas explicarían el reemplazo de cianófitas por *C. hirundinella*. El desarrollo de floraciones de *C. hirundinella* también ha sido observado en condiciones de mezcla en el Embalse San Roque (véase Tabla 2). Estos episodios de menor frecuencia coincidieron con altas temperatura y concentraciones de PT, lo que sugiere que si bien la estabilidad de la estratificación es uno de los factores principales para su desarrollo, no es condición excluyente para que se produzcan eventos de floración de esta especie.

En el caso del segundo solapamiento, puede señalarse que el cambio de la dominancia de diatomeas hacia las cianófitas en condiciones de mezcla, ha sido observado como dependiente de la concentración de sílice (Hawkins y Griffiths, 1993). La ausencia o disponibilidad de este nutriente podría explicar en parte lo observado en la Figura 15 entre *A. spiroides* y *Cyclotella sp*. Por otra parte, se ha señalado que altos valores en la relación $Z_{mezcla}/Z_{eufótica}$ favorecen el desarrollo de diatomeas (Hawkins y Griffiths, 1993). En el embalse San Roque la escasa transparencia prevaleciente (profundidad de visibilidad del disco de Secchi máxima observada de 2,1 m) determina que la profundidad mezcla siempre sea superior a la profundidad de la zona eufótica, lo cual explicaría el desarrollo menos frecuente, de *Cyclotella sp* en condiciones de estratificación (Tabla 2).

CONCLUSIONES

Los análisis realizados revelaron un control significativo de los factores físicos sobre la dinámica del fitoplancton. Las altas concentraciones de los nutrientes (nitrógeno y fósforo), la estratificación térmica estival y las altas temperaturas imperantes, son condiciones observables en el embalse que contribuyen a su estado eutrófico.

El registro y el análisis de las condiciones locales bajo las cuales se producen eventos de floración, permitieron establecer probabilidades empíricas en función de la condición térmica y nivel del embalse, para cada una de las algas de mayor relevancia.

La combinación de situaciones de baja en el embalse con altas temperaturas independientemente de la estratificación, son condiciones aptas para el desarrollo de floraciones de cianófitas. Por otro lado altos niveles del embalse con un marcado grado de estratificación favorecen las floraciones de *C. hirundinella*.

La evacuación por vertedero, es una situación deseable, ya que el registro de floraciones en esta condición es de menor frecuencia.

El conocimiento de estos aspectos se involucra íntimamente con el seguimiento de la calidad de las aguas del embalse y las diversas acciones posibles que deberían tomarse para el control del alto estado trófico del embalse.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la DiPAS, por la valiosa colaboración brindada que permite la realización de las campañas de monitoreo al Embalse San Roque.

BIBLIOGRAFÍA

- APHA (1999) *Standard Methods for the Examination of Water and Waste-Water*, USA.
- Bonetto, A A, Di Persia, D H, Maglianesi, R y Corigliano, M C (1976) “*Caracteres limnológicos de algunos lagos eutróficos de embalse de la región central de la Argentina*”, *Ecosur* 3(5):47-120.
- Bustamante, M A; Granero, M; Bonetto, C; Morillo, S y López, F (2002) “*The role of nutrients, physical processes and climatological factors on cyanophytes and dinoflagellates summer blooms*”, 4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality, Ceske Budejovice, Rep. Checa.
- Dokulil, M. (1984) *Mezcla y tamaño de las células, en Embalses Fotosíntesis y Productividad Primaria*, Universidad Nacional de Chile, 127:134.
- Gavilán, J.G. (1981) “*Study water quality in the San Roque reservoir*”, *Water Quality Bulletin Environment Canada* 6(4):136-158.
- Granero, M; Bustamante, M A y Ruiz, M (2002) “*Hypolimnion water quality in an eutrophicated water body: San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina)*” 4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality, Ceske Budejovice, República Checa.
- Harris, Heaney y Talling, (1979) “*Physiological and environmental constraints in the ecology of planktonic dinoflagellate Ceratium hirundinella*”, *Freshwater Biology* (9):413-428.
- Hawkins, P.R. and Griffiths, D.J. (1993) “*Artificial destratification of a small tropical reservoir: effects upon phytoplankton*”, *Hydrobiologia* 254: 169-181.
- Helmbrecht, J y López, F (2000) “*Predictores físicos de la calidad del recurso en el Lago San Roque (Córdoba, Argentina)*” XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba.
- López, F (1997) “*Numerical modelling of the seasonal thermal stratification in Lake San Roque*”, 7º Conf.Int.Cons.y Cons.Lagos, San Martín de los Andes, Argentina.
- Lindenschmidt, K.E. (1999) “*Controlling in the growth of Microcystis using surged artificial aeration*”, *Internat. Rev. Hydrobiol.* 84 (3) 243:254
- Margalef, R. (1983) *Limnología*, Ed. Omega, España.
- Morillo, S; Dasso, C; Bustamante, M A; Granero, M y López, F (2002) “*Modelación unidimensional de la limnología física del Embalse San Roque, Córdoba, Argentina*”, XIX Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Pérez-Martínez C. and Sánchez-Castillo, P (2002) “*Winter dominance of Ceratium hirundinella in a southern north-temperate reservoir*”, *Journal of Plankton Research* 24 (2): 89-96.
- Pizzolón, L; Tracanna, B, Silva, H; Prósperi, C; Fabricius, A L; García de Emiliani, M O; Otaegui, AV; Labollita, H; Santinelli, N y Sastre, V (1991) “*Inventario de ambientes dulceacuicolas de la Argentina con riesgo de envenenamiento por cianobacterias*”, *Ingeniería Sanitaria y Ambiental* 33(Agosto):26-34.
- Reynolds, C.S. (1984) *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rodríguez, M I; Cossavella, A; Oroná, C; del Olmo, S; Larrosa, N; Rodríguez, A; Avena, M; Mariscal, M; Castelló, E; Miatello, F; Pagot, M; Moya, G; Hilman, G; Bazán, R; Jaureguialzo, G; Ormeño, N; Bertucci, C y Martínez, M, (2000) “*Estudios preliminares de la calidad de agua y sedimentos del embalse San Roque relacionados al proceso de eutrofización*”, XVIII Congreso Nacional del Agua, Santiago del Estero.
- Rosén, G (1981) “*Phytoplankton indicators and their relations to certain chemical and physical factors*”, *Limnologica* (Berlin) 13(2):263-290
- Ruibal, A L; Bustamante, A; Granero, M; López, F; Girbal, A; Lammel, E; Simonin, M E y Busso, F (1999) “*Estudio de la evolución de la calidad de agua del Embalse del Dique San Roque (Córdoba) asociado al desarrollo de floraciones de Ceratium*”, Congreso Argentino de Grandes Presas y Aprovechamiento Hidroeléctrico, San Martín de los Andes, Argentina.
- Ruibal, AL (2003) *Seasonal Variation of Microcystins in Argentinean Inland Waters*, Thesis, Kyoto University, Department of Global Environment Engineering, Japan.
- Ryding, S.O. y Rast, W. (1992) *El Control de la Eutrofización en Lagos y Pantanos*, Ediciones Pirámide, España
- Scarafia, M E, Agnese, AM, and Cabrera, J L (1995) “*Microcystis aeruginosa: behaviour and toxic features in San Roque Dam (Argentina)*”, *Natural Toxins* 3:75-77, 1995.
- Straskraba, M; Blazka, P; Brandl, Z; Hejzlar, P; Komarkova, J; Kubecka, J; Nesmerak, I; Pochazkova, L; Straskraba, V and Vynhnalek, V. (1993) *Framework for investigation and evaluation of reservoir water quality in Czechoslovakia Chapter XII in Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- van Ginkel, C E; Hohls, B C and Vermaak, E (2001) “*A Ceratium hirundinella (O.F. Müller) bloom in Hartbeespoort Dam, South Africa*”, *Water SA* 27(2):269-276.
- Wetzel, R (1981) *Limnología*, Ed. Omega, España.