

Dinámica térmica de cuerpos de aguas eutróficas: caso Embalse San Roque

María F. Degano¹²; María I. Rodríguez³ y Clarita M. Dasso³

¹Estudiante avanzado de la Carrera de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

²Pasante del Programa de Becas y Pasantías del Instituto Nacional del Agua, Centro de Investigación de la Región Semiárida, Argentina

³Área Limnología Aplicada y Calidad de Aguas, Instituto Nacional del Agua, Centro de Investigación de la Región Semiárida, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 14/08/2015

Fecha de aceptación del manuscrito: 11/02/2016

Fecha de publicación: 15/03/2016

Resumen — El estudio y determinación de los modelos de estratificación termal es relevante ya que influyen de manera fundamental en los ciclos físicos y químico-biológicos de los lagos y embalses. En el siguiente trabajo se presenta el caso del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina) y se describe su régimen térmico estacional. Sobre la base de datos comprendida en el período 1999-2014, se analiza el comportamiento estacional en la columna de agua del embalse considerando la temperatura, conductividad y oxígeno disuelto en dos áreas del cuerpo de agua y se aplica un indicador de estratificación para dichas variables. La metodología utilizada fue satisfactoria para describir la dinámica de estratificación del embalse San Roque siendo clasificado como monomictico cálido, con presencia de una estratificación estival y una mezcla otoñal. Esta dinámica incide negativamente por la condición eutrófica del embalse. La desembocadura presenta características particulares asociadas a la calidad y volumen del tributario.

Palabras clave— régimen térmico, calidad de agua, eutrofización.

Abstract— The study and determination of thermal stratification models is important because of its fundamental influence on the physical, chemical and biological cycles of lakes and reservoirs. In this paper the case of the San Roque Dam (Cordoba, Argentina) is studied and a seasonal thermal regime described. We worked on the database that covers the period from 1999 to 2014. The seasonal behavior of the parameters of temperature, conductivity and dissolved oxygen are analysed in two areas of the reservoir, and an indicator of stratification is applied to the variables. The methodology used was satisfactory to describe the dynamics of stratification San Roque Dam being classified as warm monomictic. The water body presents summer stratification and an autumnal mixing. This behavior negatively affects the water quality of the reservoir because of its eutrophic condition. The mouth river has specific characteristics associated with its water quality and volume.

Keywords— thermal regime, water quality, eutrophication.

INTRODUCCIÓN

El aumento en los niveles de contaminación de las aguas superficiales ha generado la necesidad de cuantificar y evaluar la calidad de los cuerpos de agua. Para conocer las condiciones de contaminación en un determinado lago o embalse, es necesario caracterizarlo en un lapso de tiempo representativo en función de aspectos físicos, químicos y biológicos. Uno de los principales problemas de calidad de aguas asociado a fuentes de abastecimiento es la eutrofización (Klapper, 1991 y Prats *et al.*, 2014). Este proceso que se da naturalmente en ecosistemas acuáticos, puede acelerarse por causas antrópicas. La eutrofia en lagos y embalses es causada por un exceso de nutrientes y se refleja en una sobreproducción

de fitoplancton, que se traduce en un aumento de la productividad del sistema (Wetzel, 1981).

El enriquecimiento de nutrientes de fósforo (P) y nitrógeno (N) es posible que se incremente por las actividades humanas que se realizan en la cuenca como la deforestación, el desarrollo agrícola, industrial y/o urbanístico. Las aguas superficiales pueden recibir cargas de nutrientes externas e internas, las primeras se dan por fuentes puntuales y difusas que llegan de modo directo al cuerpo de agua o bien a través de cursos superficiales y escorrentía. Las cargas o fuentes internas se originan por el reciclaje de N y del P de los sedimentos. Estos últimos pueden sustentar condiciones eutróficas durante largos periodos, incluso una vez que la carga externa se ha reducido (Margalef, 1983).

La eutrofización causa diferentes efectos, entre ellos el desarrollo masivo de algas y cianobacterias, la disminución de la transparencia, agotamiento del oxígeno en el hipolimnio y mortandad de peces. Además, una mayor abundancia de algas puede interferir en los procesos de

Dirección de contacto:

María Florencia Degano, Av. Ambrosio Olmos 1142, 1° piso, X5000 JGT.
Tel: 351-4682781, degano.mf@gmail.com.

potabilización y producir sabores y olores desagradables en el agua. También es frecuente en cuerpos eutróficos, el crecimiento de plantas acuáticas flotantes que cubren extensas superficies y producen gran cantidad de detrito orgánico que contribuye a generar anoxia y emisión de gases como metano y ácido sulfhídrico (Welch, 1980).

Por otro lado, la calidad del agua está estrechamente ligada a los procesos físicos e hidrológicos. En relación a la eutrofia, la temperatura es un factor que aumenta la productividad al aumentar la tasa de reciclado de materia en el sistema (Klapper, 1991). Además, debido al efecto de la temperatura, se genera lo que se denomina estratificación térmica. La propiedad del alto calor específico del agua permite la acumulación de la energía luminosa, al disiparse ésta en forma de calor. La retención del calor está ligada a ciertos factores, que influyen sobre su distribución dentro del sistema lacustre como son la energía eólica, corrientes y otros movimientos del agua, morfometría de la cubeta y pérdidas de agua. Los modelos resultantes de estratificación termal influyen de manera fundamental sobre los ciclos físicos y químicos de los lagos y embalses que rigen la producción, utilización y descomposición de la materia (Wetzel, 1981). Esto fundamenta la importancia de conocer cuál es la dinámica térmica de un determinado cuerpo de agua y las implicancias que pudiera tener en caso de ser éste eutrófico.

En Argentina, hay serios problemas de eutrofización y desarrollo masivo de cianobacterias en lagos y en embalses que son fuentes de agua potable como el embalse San Roque (Córdoba), Paso de Las Piedras (Buenos Aires) y Cruz de Piedra (San Luis) (Gianuzzi, 2009). El embalse San Roque es la principal fuente de abastecimiento de agua para la Ciudad de Córdoba, con una población aproximada de 1,3 millones de habitantes. El problema de eutrofización que presenta ha sido ampliamente referenciado y es emergente de una problemática ambiental que involucra el tipo de uso del suelo de la cuenca y de los conflictos que se generan al ser un embalse de usos múltiples (Granero *et al.*, 2004; Ruibal Conti *et al.*, 2005 y Rodríguez *et al.*, 2008).

Existen una serie de medidas sugeridas para la gestión y el control de la eutrofización que difieren en su escala espacial y con distinto grado alcance en el tiempo. Una de ellas es la instalación de difusores con el objeto de impedir la estratificación térmica. La misma requiere entre otros aspectos, un conocimiento local y continuo de este proceso en el embalse. Desde el año 2008 se halla instalado en el embalse San Roque, un sistema de aireación artificial para mitigar esta problemática (Ferral, 2013). La valoración y los efectos producidos de esta medida en el embalse, no se incluyen en el presente trabajo.

El objetivo del estudio realizado es describir la dinámica de estratificación del embalse San Roque a través del análisis de las mediciones realizadas y del procesamiento de datos históricos. Además, se informan parámetros morfométricos del embalse y se discute cómo afecta la dinámica térmica en la calidad de agua del embalse. El estudio se enmarca en el Proyecto de Actividad Permanente de Monitoreo del embalse San Roque y gestión de información de calidad de aguas que se realiza en el INA-CIRSA.

ÁREA DE ESTUDIO

El embalse San Roque se localiza en el Valle de Punilla (31°22'36"S y 64°27'54"O) a 608 m sobre el nivel del mar, entre las Sierras Grandes y las Sierras Chicas en la provincia de Córdoba, Argentina (Fig. 1). Es un cuerpo de agua artificial cuyo primer muro data del año 1888 y fue reemplazado en 1944 por la presa actual. A nivel de cota de vertedero, la superficie del embalse es de 16 km², con un volumen máximo de 190 Hm³ y una profundidad media de 13 m. La cuenca alta de Río Suquía o Primero, único emisario del embalse, está conformada por las subcuencas de los cuatro tributarios que desembocan en el embalse, con una superficie total de 1750 km², ellas son: Río San Antonio (505 km²), el Río Cosquín (820 km²), el Arroyo Las Mojarras (85 km²) y el Arroyo Los Chorrillos (160 km²), (Dasso *et al.*, 2014).

Desde el punto de vista climático, el régimen de precipitación en la cuenca se presenta con una gran variación espacio temporal. Las lluvias, a lo largo del año hidrológico se distribuyen en dos ciclos bien diferenciados: uno húmedo (noviembre - abril) y otro seco (mayo - octubre). También a nivel anual se observa una alternancia de años muy húmedos (precipitaciones anuales superiores a 1000 mm) con otros secos que apenas superan los 400 mm. La cuenca del Río San Antonio está caracterizada por una precipitación media anual de 819 mm, para el período 1992-2012 (Colladón, 2012). Bajo el dominio de un clima templado, la temperatura media anual es de 14 °C y los vientos predominantes son del cuadrante sur y norte (Dasso y López, 2000).

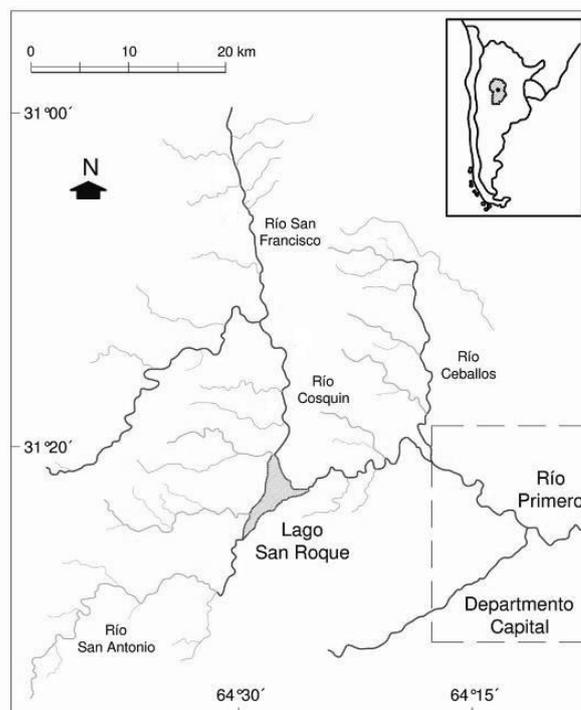


Fig. 1. Ubicación del embalse San Roque con sus principales afluentes y efluente (Vázquez *et al.*, 1979).

METODOLOGÍA

Mediciones físico-químicas

Los parámetros medidos *in situ* en la columna de agua cada un metro, fueron oxígeno disuelto (mg/L); temperatura (°C) y conductividad (µS/cm) a través de una sonda multiparamétrica WTW Multi 350i. La transparencia en metros, fue medida a través de la profundidad del disco de Secchi (Z_{ds}) (Fig. 2).

La profundidad de límite de zona fótica Z_{fot} (1% de la luz incidente en superficie suficiente para la fotosíntesis) se estimó multiplicando la profundidad de Secchi por un factor de 2,5 (Marshall *et al*, 1991).

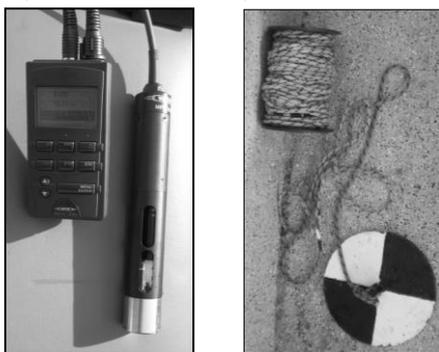


Fig. 2: Disco de Secchi y sonda multiparamétrica WTW.

En la Fig. 3 se indican los puntos en los que se realizaron las mediciones. El diseño espacial horizontal responde a la morfología del embalse, en donde el centro (C) y la desembocadura de los tributarios son sitios que pueden presentar variaciones entre sí. En la desembocadura del río San Antonio (DSA) las características son más críticas en relación a la calidad de agua; la desembocadura del río Cosquín presenta algunas peculiaridades asociadas a las características de suelo de su cuenca (que eleva su conductividad). El centro se define como un punto promedio para el embalse en aspectos físicos, químicos y biológicos (Rodríguez, 2006).

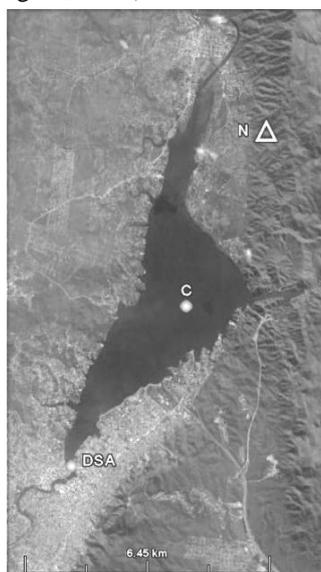


Fig. 3: Puntos de monitoreo en el embalse en desembocadura DSA (San Antonio) y centro (C) (Imagen extraída de Google Earth, 5.2.1.1588).

Se analizaron estacionalmente los datos de las variables mencionadas comprendidos en los años hidrológicos 2002/03, 2007/08 y 2013/14, en el Centro del embalse (C) y en la desembocadura del Río San Antonio (DSA).

Determinación de termoclina

Según Birge (Cole, 1988), la termoclina se limita a la zona media de la columna de agua de un lago o embalse, donde la temperatura desciende por lo menos 1 °C en cada metro de incremento de la profundidad. Hutchinson (1957) conservó la palabra termoclina y la consideró como un plano imaginario, localizado a un nivel intermedio entre las dos profundidades donde la tasa de disminución de temperatura es mayor. Esta termoclina plana, yace dentro del metalimnio o lo que sería la termoclina de Birge (Cole, 1988). En el presente trabajo, se tiene en cuenta el límite superior de la termoclina de Birge, es decir donde comienza el gradiente de temperatura equivalente a disminución de 1 °C con descenso de 1 m en profundidad que permite distinguir epilimnio de metalimnio e hipolimnio (Fig. 4).

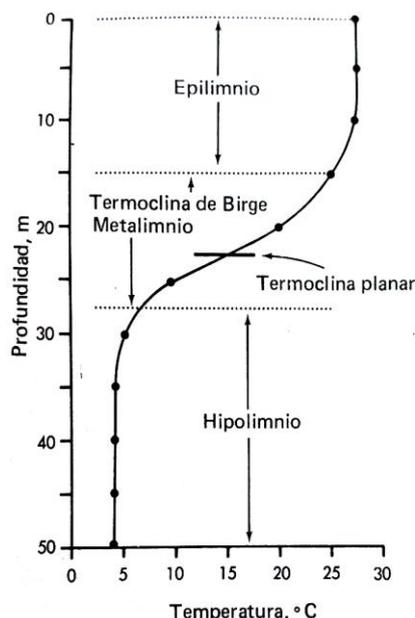


Fig. 4. Perfil de temperatura vertical y ubicación de termoclina de Birge y planar (extraído de Cole, 1988).

Clasificación del régimen térmico del embalse

Para categorizar el embalse se utilizó la clasificación propuesta por Wetzel (1981) y Hutchinson, (1957), dinámica de mezcla en función de la altitud y la latitud (Fig. 5). Además, se aplicó el diagrama de Henderson (Fig. 6).

Se utilizó para el análisis de variables asociadas al régimen térmico, el Coeficiente de Distinción de Estratificación (CDS) propuesto por Straskraba (1987).

Según este indicador, el grado de estratificación se basa en la diferencia entre el valor máximo y mínimo de un parámetro (X) en un perfil de columna de agua dado. Como medida se introduce el coeficiente de estratificación, cuyo cálculo se muestra en la ec. (1).

$$CDS = \frac{X_{\max}}{X_{\min}} \quad (1)$$

Este valor es independiente de los valores absolutos y depende del rango total de variación del parámetro. La Tabla 1 contiene los valores críticos de variables con un rango posible de variación por debajo y por encima de 10.

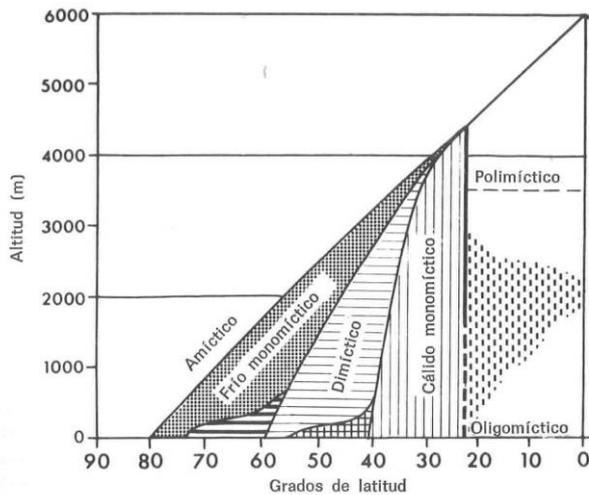


Fig. 5. Esquema de los tipos de lagos según la latitud y la altura (según Hutchinson y Löfer, 1956 en Wetzel, 1981).

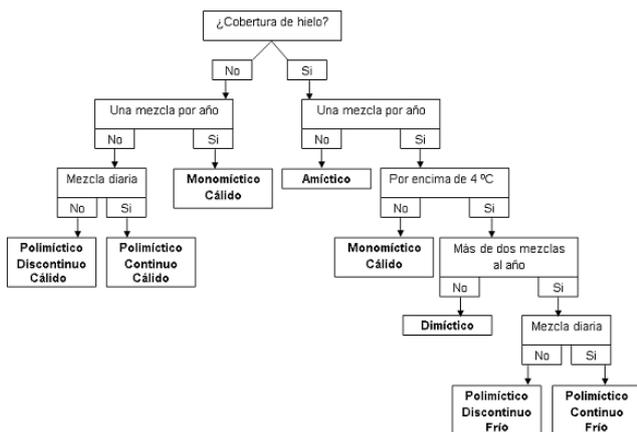


Fig. 6. Clasificación de lagos de acuerdo a su régimen térmico según Diagrama de Henderson.

TABLA 1. Valores críticos del coeficiente de distinción de estratificación (CDS_{crit}) en función del rango de la variable.

Rango de la variable		Condición
≥ 10	< 10	
CDS_{crit}		
$\geq 1,5$	$\geq 1,2$	Estratificado
1,1 – 1,4	1,05 – 1,1	No estratificado

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran los parámetros del embalse que según Hutchinson (1957) pueden afectar su dinámica térmica.

Los procesos de formación y desplazamiento de la termoclina son importantes, ya que son considerados como los principales reguladores de la actividad química y biológica de lagos y embalses. La profundidad a la que se halla la termoclina se relaciona con la morfometría y con algunos factores meteorológicos. No obstante, los procesos

que llevan al desarrollo de la estratificación térmica en un cuerpo de agua, involucran una serie de complejas interrelaciones que operan durante el cambio de energía en la interfase aire-agua y en los mecanismos de su distribución interna.

TABLA 2: Ubicación geográfica, características meteorológicas y morfológicas del embalse san roque

Latitud	31°22'36"S
Longitud	64°27'54"O
Altitud	608 msnm
Clima	Templado
Temperatura media anual	14°C
Velocidad y dirección del viento	Media anual: 5,7 km/h Max: 64 km/h Cuadrante Sur y Norte
Profundidad media	13 m
Longitud máxima efectiva	7,01 km
Morfología	Triangular
Tiempo de residencia	0,6 años

Descripción de la dinámica térmica en el Centro del embalse (2002/03)

Durante el otoño (mayo), se observa el embalse sin estratificación siendo la temperatura media en la columna de agua de 16 °C (Fig. 7a). Durante el invierno el período de mezcla continúa y en agosto la temperatura media desciende en las capas más profundas a 12 °C (Fig. 7b). En la primavera (noviembre), con el aumento de la temperatura del aire (22 °C), las capas superficiales se calientan (Fig. 7c). A fines de la primavera, el calentamiento del agua superficial del embalse es más rápido que la distribución de calor por la mezcla. Cuando las aguas superficiales se calientan, su densidad baja y la resistencia termal relativa a la mezcla aumenta (Fig. 7d). Una diferencia de pocos grados alcanzan para evitar la circulación completa de toda la columna. A partir de ese momento el agua se divide en dos regiones de distintas temperaturas, que son resistentes a mezclarse entre sí y el embalse en enero se halla estratificado (Fig. 7e).

Durante el período de estratificación estival el epilimnio posee aguas más o menos uniformemente cálidas con una temperatura media de 25 °C, y el hipolimnio está situado sobre una zona más profunda, fría y calma. El estrato de metalimnio, entre el epilimnio y el hipolimnio, presenta un notable descenso termal demarcado por las intersecciones de un plano, situado a lo largo del gradiente hasta los puntos de curvatura máxima (de 11 y 13 m). La temperatura media del hipolimnio entre los 13 y 17 m es de 21 °C.

Se observa en el primer metro la presencia de una termoclina secundaria. Esta situación es frecuente y se produce por el calentamiento superficial diario y ausencia de vientos.

Con el comienzo del otoño, disminuyen las temperaturas del aire (de una media de 27 °C a 16 °C), generando pérdidas de calor. Las aguas superficiales se enfrían, se tornan más densas, se hunden y mezclan por corrientes de convección y circulación inducida por el viento. La penetración de las aguas superficiales en el metalimnio continúa mientras el embalse va enfriándose y el metalimnio va perdiendo espesor, al contrario del

epilimnio. Finalmente en abril, todo el volumen de agua entra en circulación, iniciándose la mezcla otoñal (Fig. 7f).

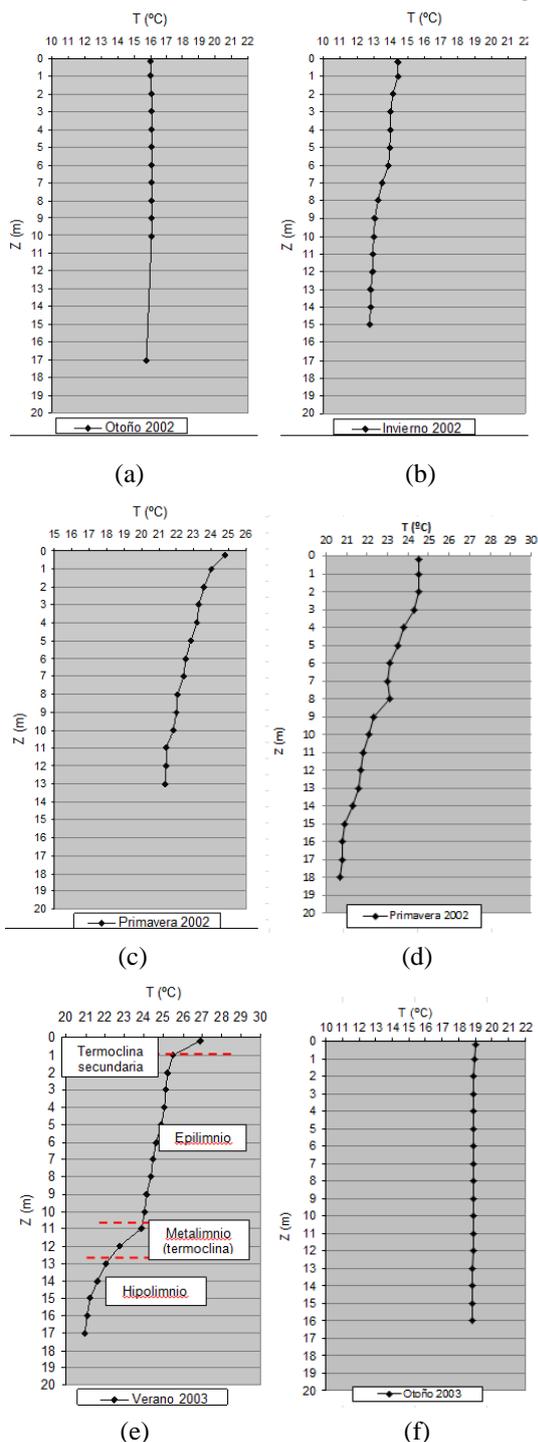


Fig. 7: Perfiles estacionales de temperatura, año 2002/03, Centro.

La circulación continúa con el enfriamiento gradual de la columna de agua, que llega a un mínimo de 12 °C en invierno.

De este modo se observa que el régimen térmico del embalse San Roque está determinado por la dinámica estacional y diaria de temperaturas.

La presencia de termoclinas que se generan en el día es un fenómeno frecuente e incluso pueden presentarse más de una y persistir durante varios días (Hutchinson, 1975).

La transición desde los últimos estados de una estratificación estival débil hasta la circulación otoñal

puede darse en pocas horas (Wetzel, 1981) y depende también de las condiciones particulares del cuerpo de agua. En el embalse San Roque, el perfil de estratificación puede verse alterado en pocos días producto de la variación en el tiempo de retención al aumentar el volumen de descargas ya sea por la evacuación por vertedero o por la apertura de las válvulas. También es factible una ruptura de la misma por acción de los vientos que pueden alcanzar un máximo de más de 64 km/h (Dasso y López, 2000). El patrón descrito, con una mezcla anual y sin presencia de cobertura de hielo corresponde a la clasificación de cuerpos monomíticos cálidos (Fig. 6) y es coincidente con la clasificación de Hutchinson y Löfer que considera la latitud (31° 22' LS) y altitud (< 1000 m) a la que se encuentra el embalse (Fig. 5).

La dinámica descrita puede presentar variaciones asociadas en cuanto a permanencia de la estratificación, profundidad de termoclina y valor medio de la columna de agua asociada a las variaciones interanuales meteorológicas de precipitaciones, vientos y temperatura como así también a la operación del embalse. La Tabla 3 resume los valores medios estacionales calculados para el período 1999-2014 en el centro del embalse.

TABLA 3. Valor medio estacional y desvío estándar, de temperatura c1=subsuperficial 0,2 m y c5= 1 metro encima del fondo (1999-2014).

Época	Sitio	\bar{X}	$\bar{X} - DS$	$\bar{X} + DS$
Primavera	C1	20,9	17,3	24,5
	C5	19,0	16,0	21,9
Verano	C1	24,9	23,8	25,9
	C5	22,3	20,2	24,3
Otoño	C1	18,5	14,9	22,1
	C5	17,9	14,7	21,1
Invierno	C1	12,0	10,5	13,4
	C5	11,6	10,3	12,9

Coficiente de estratificación (CDS)

El CDS calculado para la conductividad (Cond.), el oxígeno disuelto (OD) y la temperatura (T) para el año hidrológico 2002/03 se muestran en la Tabla 4.

En otoño, el cociente entre la conductividad máxima y mínima no supera el CDS_{crit} , indicativo de que el embalse no se encuentra estratificado, es decir que la diferencia en conductividad entre el estrato superior e inferior en la columna de agua, no es significativa reflejando la condición de mezcla. Resultados coincidentes se observan para el valor de CDS de la T. Sin embargo, el CDS para el OD indica una estratificación de este parámetro cuando el embalse se halla en circulación (Tabla 4), tal situación responde a que el OD es un componente altamente involucrado no sólo a procesos físicos sino también a procesos biológicos de producción y consumo. Incrementos considerables en los estratos superiores de la columna de agua se asocian al proceso de fotosíntesis en tanto que un aumento de la tasa de consumo de oxígeno es debido a los procesos de descomposición microbiana en el fondo del embalse. En el embalse San Roque, además de la anoxia típica del periodo de estratificación, es posible que se

presente una oxiclina en condiciones en que no se halla estratificado. Esta condición se cita como característica de embalses hipereutróficos (Pratts *et al.*, 2014).

En verano, los valores de CDS_{crit} fueron superados en las tres variables, reflejando las condiciones de estratificación de un embalse eutrófico.

TABLA 4. Valores de cds - periodo 2002/03.

Fecha	28/05/02		27/08/02		19/11/02		28/01/03	
Época	Otoño		Invierno		Primavera		Verano	
Z (m)	0,2	17	0,2	15	0,2	13	0,2	17
Cond. ($\mu S/cm$)	215	217	265	265	275	265	216	178
CDS_{crit}	1,01		1		1,04		1,21	
OD(mg/l)	12,7	9,7	11,1	9,1	10,3	5	15	0
CDS_{crit}	1,31		1,22		2,06		>1,5	
T ($^{\circ}C$)	16	16	14,4	12	24,7	21	27	21
CDS_{crit}	1,01		1,13		1,15		1,28	
Estrat.	No		No		No		Sí	

Descripción de perfiles de temperatura y conductividad y CDS en el sector de desembocadura del Río San Antonio

En la Fig. 8 se muestra la variación en el perfil de temperatura y conductividad en distintos meses del año hidrológico 2013/14.

A finales del invierno (agosto 2013), la temperatura en el perfil de la desembocadura tiene un rango de 11 a 13 $^{\circ}C$ y la conductividad de 380 a 389 $\mu S/cm$, sin variaciones significativas en el perfil. El CDS, indica igualmente que no hay diferencias importantes en la columna de agua (Tabla 5).

La columna se presenta mezclada y la conductividad del agua se eleva por una disminución en el volumen del caudal ingresante y del nivel del embalse. El sector monitoreado es previo al punto de inmersión del agua entrante (la Conductividad en el centro del embalse en la misma fecha es de 223 $\mu S/cm$).

En verano (enero 2014), la temperatura subsuperficial es de 25 $^{\circ}C$, disminuyendo 2 $^{\circ}C$ en profundidad. La conductividad desciende en relación a la época anterior (128 $\mu S/cm$) debido al efecto de dilución en la época de lluvias, y es homogénea en el perfil.

En febrero 2014 se observa que tanto la conductividad como la temperatura, descienden hacia el fondo a partir de los 2 m. El río se distribuye ingresando por encima de las aguas del embalse.

En otoño (mayo 2014) se observa una disminución de temperatura y un aumento de conductividad hacia el fondo. El CDS refleja una condición de estratificación.

Los valores de conductividad del fondo superan la media del embalse. El agua del río con una temperatura menor, más densa, se distribuye por debajo de las aguas menos densas del embalse. Esta dinámica ha sido descrita por Henderson-Sellers y Markland (1987) y sucede de esta forma en otoño, invierno y durante las horas nocturnas.

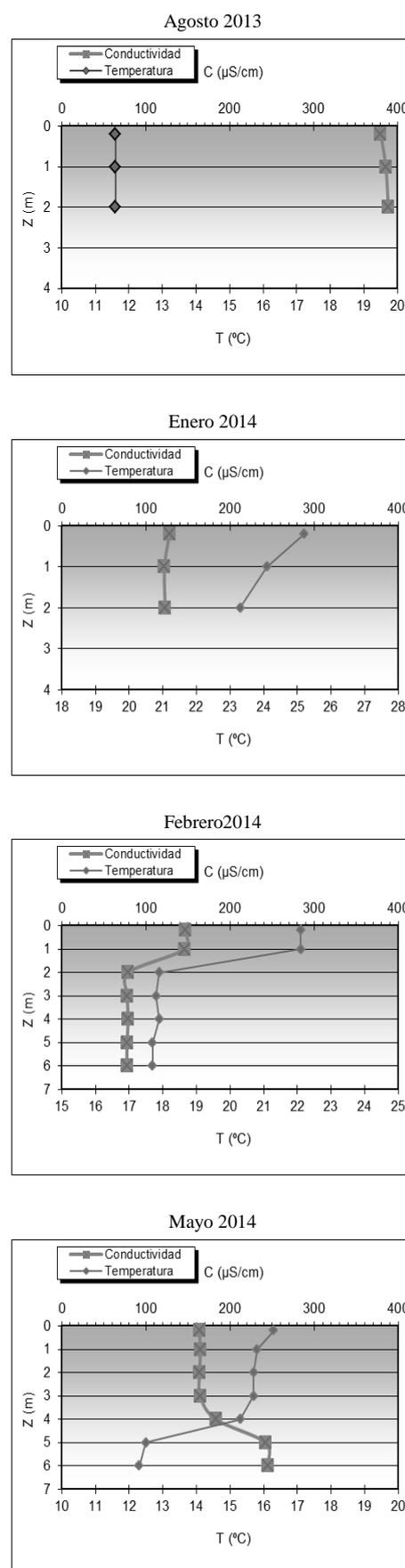


Fig. 8: Perfiles de temperatura y conductividad en sector de desembocadura del Río San Antonio.

La conductividad en el área de la desembocadura del Río San Antonio refleja las variaciones estacionales en caudal

del tributario. En invierno cuando los volúmenes aportados son menores las conductividades son máximas, en tanto que en primavera y verano por efecto de dilución las mismas disminuyen. El nivel en que se ubica el agua del río que fluye y se introduce al embalse depende de su densidad (temperatura, materiales disueltos y sólidos suspendidos) y de la del cuerpo receptor.

Comparando los valores de conductividad de la desembocadura en relación al centro, se registra en la primer area un mayor rango de variabilidad (DSA: 77-389 $\mu\text{S/cm}$ y C:178-265 $\mu\text{S/cm}$). Esto se asocia con la presencia de un gradiente espacial longitudinal en dirección desembocadura-presa observable en embalses con cierto grado de renovación estacional de sus aguas (Straskrava *et al.*, 1993).

TABLA 5. detalle de los valores de cds para conductividad en el sector de la desembocadura del río san antonio (2013/14).

	Fecha	Prof. (m)	Cond. ($\mu\text{S/cm}$)	CDS _{crit}	Estrat.
Invierno	30/07/13	0,2	380	1,03	No
		1,0	389		
	27/08/13	0,2	380	1,02	No
		2,0	389		
Primavera	24/09/13	0,2	290	1,01	No
		1,0	294		
	29/10/13	0,2	319	1,09	No
		1,0	347		
	27/11/13	0,2	135	1,01	No
		1,0	134		
	17/12/13	0,2	216	1,50	Sí
		1,0	144		
Verano	27/01/14	0,2	128	1,04	No
		2,0	123		
	28/02/14	0,2	147	1,91	Sí
Otoño	25/03/14	0,2	152	1,17	No
		4,0	178		
	29/04/14	0,2	165	1,00	No
		1,0	165		
	27/05/14	0,2	163	1,50	Sí
		6,0	245		

Metalimnio y zona fótica en el centro del embalse.

En febrero de 2014 la transparencia de Secchi en el centro del embalse fue de 1,6 m y el límite de la zona fótica se ubicó a 4 m ($2,5 \times Z_{ds}$). Con una termoclina a 10 m, la Z_{fot} quedó incluida dentro de la zona de mezcla de la columna de agua. Esta situación registrada en el embalse es común en los periodos de verano cuando el embalse se estratifica. La media anual de transparencia es de 1 m y la ubicación de la termoclina oscila entre los 5 y 10 m; esto provoca que lo más frecuente sea que la zona fótica se ubique dentro del estrato de mezcla (Fig. 9). En esta situación, la disponibilidad de luz para el fitoplancton tiende a ser baja. El fitoplancton circula por turbulencia en la capa de mezcla, y la proporción de tiempo que las células pasan a la luz, determina su desarrollo. Cuanto mayor sea la zona de mezcla con respecto a la parte iluminada de la columna de agua, mayor será el desplazamiento de células

fuera de la zona de luz. Este movimiento restringe el crecimiento de algunos componentes del fitoplancton en tanto puede favorecer desarrollo de aquellos otros que pueden posicionarse por medios propios en la columna de agua. Tal es el caso de las cianobacterias, que poseen mecanismos de regulación de la flotabilidad que les permite superar esta limitación de luz, en particular durante las condiciones estratificadas (Lawrence *et al.*; 2000; Newcombe *et al.* 2010).

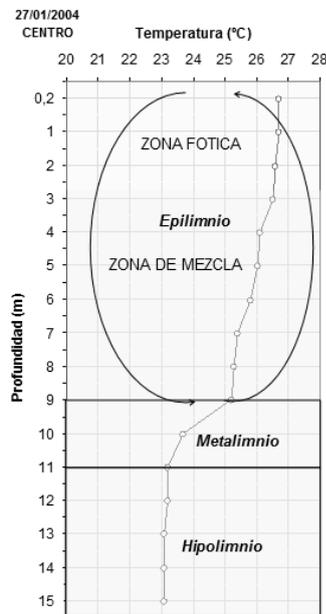


Fig. 9 Zona fótica y zona de mezcla en condiciones típicas de estratificación en el centro del embalse San Roque (27/01/04).

CONCLUSIONES

La metodología utilizada fue satisfactoria para describir la dinámica de estratificación del embalse San Roque y posibilitó clasificar el régimen térmico como monomítico cálido. Las aguas del embalse se estratifican en verano y comienzan a circular en otoño. Esta condición de mezcla se mantiene durante todo el invierno. En el comienzo de la primavera se registra una disminución gradual de la temperatura en el perfil de la columna de agua, iniciando nuevamente el ciclo.

El análisis del comportamiento de las variables de temperatura del agua y conductividad en el sector de desembocadura permitió detectar la dinámica que presenta el agua ingresante al embalse y su ubicación relativa a las del cuerpo receptor. Esta área fue marcadamente diferente en relación al centro, es más estrecha y de mayor flujo, se caracterizó por presentar mayor variabilidad temporal en temperatura y conductividad.

Los valores del CDS arrojaron resultados coincidentes en general al análisis gráfico realizado y permite detectar situaciones de excepción al indicar estratificación de variables como el OD en condiciones de mezcla debidas a procesos biológicos.

El régimen térmico que presenta el embalse San Roque acrecienta su vulnerabilidad al proceso de eutroficación que manifiesta ya que la anoxia de las capas profundas induce a la liberación y aporte de nutrientes desde el sedimento.

Las relaciones establecidas entre la profundidad de la termoclina y la zona fótica permitieron visualizar el modo en que los factores físicos afectan la dinámica biológica, particularmente del fitoplancton. La estratificación y la turbidez influyen en la cantidad de luz que reciben los organismos fitoplanctónicos. Estas condiciones de luz contribuyen a la dominancia de cianobacterias debido a las ventajas competitivas que poseen sobre otras especies del fitoplancton.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Eduardo Piovano y al personal que integra el Área de Limnología Aplicada y Calidad de Aguas de INACIRSA.

REFERENCIAS

- [1] Cole, G. A. (1988), *Manual de limnología*, Ed. Hemisferio Sur, Argentina.
- [2] Colladón, L. (2014), *Síntesis pluviométrica 1992-2012, cuenca del río San Antonio: Sistema del Río Suquía, Provincia de Córdoba*, Instituto Nacional del Agua, E-Book. ISBN 978-987-45194-4-3 1, Ezeiza.
- [3] Dasso, C. y López, F. (2000), "Características del régimen de vientos a orillas del Lago San Roque (Provincia de Córdoba)" en *Uso y preservación de los recursos hídricos en los umbrales del Siglo XXI, Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua*. Santiago del Estero. pp 81-82.
- [4] Dasso, C. M.; Piovano, E. L.; Pasquini, A. I.; Córdoba, F. E.; Lecomte, K. L.; Guerra, L. y Campodónico, V. A. (2014), "Recursos Hídricos Superficiales" en *Relatorio del XIX Congreso Geológico de Córdoba*. Tomo II pp 1209-1231.
- [5] Ferral, A. (2013), "Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales" *Tesis de Maestría Universidad Nacional de Córdoba (FAMAF)*.
- [6] Giannuzzi, L. (2009), *Cianobacterias y cianotoxinas: identificación, toxicología, monitoreo y evaluación de riesgo*, El autor, Buenos Aires.
- [7] Granero, M.; Bustamante, A., López, F. y Ruiz, M. (2004), "Hipolimnion water quality and its relationship to internal P loading in an eutrophicated water body: San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina) *Journal of Hydraulic Research*, 42:3, pp 310-315.
- [8] Henderson-Sellers, B. y Markland, H. R. (1987), *Decaying lakes: The origins and control of cultural eutrophication*, Ed. John Wiley and Sons. Great Britain.
- [9] Hutchison, E.G. (1957), *A treatise on limnology*, Volumen I, Part 1, Wiley Interscience Publication, USA.
- [10] Klapper, H. (1991), *Control of eutrophication in inland waters*, Ellis Horwood, England.
- [11] Lawrence, I.; Bormans, M.; Oliver, R.; Ranson, G.; Sherman, B.; Ford, P. y Schofield, N. (2000) "Factors controlling algal growths and composition in reservoirs: Report of Reservoir Managers Workshops" Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology, Canberra.
- [12] Margalef, R. (1983), *Limnología*, Ed. Omega, Barcelona
- [13] Marshall Darley, W. (2011), *Biología de las algas, enfoque fisiológico*, Ed. Limusa, México.
- [14] Newcombe, G.; House, J.; Ho, L.; Baker, P. y Burch, M. (2010), *Management strategies for cyanobacteria (blue-green algae) and their toxins: a guide for water utilities*, Research Report 74, Water Quality Research Australia Limited, Australia.
- [15] Prats, J., Morales-Baquero, R. Dolz, J y Armengol, J. (2014), "Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses" *Ingeniería del Agua* 18 (1) 83-97.
- [16] Rodríguez, M. I.; Ruíz, M.; Vilchez, G.; Crema, N.; Ruibal Conti, A. L.; Bustamante, M. A.; Angelaccio, C.M.; Busso, F.; Bonfanti, E. y López, F. (2006), "Monitoreo integral de un cuerpo de agua eutrófico Embalse San Roque (Córdoba, Argentina)" *I Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*, Córdoba, Argentina.
- [17] Rodríguez, M. I.; Bustamante, M. A.; Ruibal, A. L.; Ruíz M. A. y Busso, F. (2008), "Estudio del fitoplancton en el marco de monitoreo del Embalse San Roque (Córdoba)" *IV Congreso Argentino de Limnología*, San Carlos de Bariloche.
- [18] Ruibal Conti, A. L., Guerrero, J. M. and Regueira, J. M. (2005), "Levels of microcystins in two argentinean reservoirs used for water supply and recreation: Differences in the implementation of safe levels" *Environ. Toxicol.*, 20: pp 263-269.
- [19] Straskrava, M.; Tundisi, J.G. and Duncan, A. (1993), *Comparative reservoir limnology and water quality management*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- [20] Vázquez, J. B.; Miatello, A. y Roqué, M. E. (1979) *Geografía física de la provincia de Córdoba*, Ed. Boldt, Córdoba, Argentina.
- [21] Welch, E.B. (1980), *Ecological effects of waste water: Applied limnology and pollutant effects*, Ed. E & FN Spon and Chapman & Hall, Great Britain.
- [22] Wetzel, R. G. (1981), *Limnología*, Ed. Omega, Barcelona.