

Estudio preliminar paleolimnológico del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina)

María Florencia Degano¹, María Inés Rodríguez¹, Marcia Ruiz¹, Silvana Halac¹, Ana Laura Ruibal Conti¹, Daniela Arán¹, Carolina Sada¹, Clarita Dasso^{1,2} y Eduardo Piovano².

¹INA –CIRSA

²UNC-CONICET

E-mail: degano.mf@gmail.com

RESUMEN

El estudio de la paleolimnología es de suma importancia para determinar cualquier tipo de información preservada en los sedimentos lacustres, lo que permite reconstruir la naturaleza y variabilidad ambiental de un lago o embalse y de su entorno, en el pasado. En el presente trabajo se estudia el registro sedimentario del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina), a través de un testigo de 80 cm de longitud (127 años de deposición de sedimentos), en el que se analizan distintos indicadores o “proxies”. Estudiando estos sedimentos se pudo reconstruir la variación temporal del estado trófico del embalse (materia orgánica y P), estimar una tasa de sedimentación y reconocer tres facies sedimentarias: la facies A o de fangos laminados a macizos, la facies B o de fangos macizos a laminados, y la facies C o fangosa con material macizo y gelatinoso. Los valores de susceptibilidad magnética, materia orgánica y carbonatos en cada una de la facies corresponden a una condición ambiental en particular dada por variaciones en el pH, temperatura y estado trófico. Es significativo agregar que se trata de un embalse que es fuente de provisión de agua potable para toda la ciudad de Córdoba y poblaciones aledañas, por lo que el estudio de sus aguas y sedimentos es de gran utilidad y relevancia para la sociedad.

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 representado en función de aspectos físicos, químicos y biológicos. Uno de los principales problemas de calidad de aguas en lagos y embalses es la eutrofización, debido al enriquecimiento con nutrientes como Fósforo (P) y Nitrógeno (N), tanto de fuentes puntuales como difusas que ingresan al cuerpo de agua. A esto se le suma las cargas internas de N y del P asociado a los sedimentos inducidas en condiciones de anoxia, que pueden sustentar condiciones eutróficas durante largos períodos, incluso una vez que la carga externa se ha reducido (Quirós y Drago, 1999).

Otros impactos asociados a la eutrofización son el desarrollo masivo de algas, mortandad de peces, producción de olores y sabores desagradables en el agua, problemas potenciales en salud pública debido a la presencia de cianotoxinas, crecimiento de macrófitas que pueden cubrir grandes superficies y producir elevadas cantidades de detrito orgánico que contribuye a la anoxia. Estos impactos tienen alcances imprevisibles en cuanto a duración, magnitud y extensión debido a su efecto acumulativo (Escobar *et al.*, 2005).

El San Roque es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de Córdoba (aprox. 1,3 millones de habitantes). El problema de eutrofización que presenta 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 (Rodríguez *et al.*, 2008).

Los lagos y embalses son sistemas muy sensibles a cambios en su entorno y región, como en el clima, en la red de drenaje y en la cubierta vegetal de su cuenca de captación (Williams *et al.*, 1993). El monitoreo continuo de la calidad de sus aguas es muy necesario cuando son fuente de agua para potabilización y más aún cuando prevalecen condiciones eutróficas. Sin embargo, el alcance de este seguimiento en el tiempo es limitado cuando se requiere conocer los procesos que han actuado en escalas mayores de tiempo pasado. Es aquí donde el análisis de los sedimentos adquiere relevancia fundamental usando como herramienta la limnogeología, que aborda el estudio e interpretación de los procesos físicos, geoquímicos, biológicos e hidrogeológicos en los lagos y en los registros sedimentarios de las cuencas lacustres (Last, 2002). Cuando la investigación está restringida a los registros sedimentarios del Pleistoceno Tardío-Holoceno de los lagos actuales, el estudio se refiere a la Paleolimnología (Piovano *et al.*, 2014).

Los sedimentos lacustres se acumulan en el fondo de los lagos de manera ordenada a una tasa muy variable, que depende del clima, de la geomorfología de la cuenca de drenaje y la batimetría del cuerpo de agua (Brenner *et al.*, 2002; Cohen, 2003). Los lagos artificiales pueden presentar una tasa rápida de acumulación de sedimentos, lo que permite su estudio paleoambiental a una alta resolución temporal (escala anual y/o de decenio). De esta forma es posible relacionar la información extraída de la columna sedimentaria con cambios físicos, químicos y biológicos pasados, y así, reconstruir la historia sedimentaria e hidrológica del embalse para aquellos períodos sin la información brindada por los monitoreos recientes (Escobar *et al.*, 2005).

Los sedimentos que se acumulan en el fondo de lagos y embalses están compuestos por cantidades variables de materia orgánica, minerales, fragmentos de rocas y carbonatos, sulfatos, cloruros y otros precipitados, como los óxidos de hierro, manganeso y aluminio, los cuales son un reflejo de la interacción entre los factores bióticos y abióticos que inciden tanto en la columna de agua como en su cuenca de aporte (IETC, 2001).

La columna sedimentaria de los lagos y embalses incluye componentes terrígeno, químico y biogénico, así como partículas cosmogénicas y volcanogénicas, fósiles y contaminantes (Cohen, 2003). Por lo tanto, los registros sedimentarios lacustres pueden almacenar una señal temporal integrada de los procesos naturales y

antrópicos a través de la deposición de materiales bióticos y abióticos derivados del lago, la tierra, y la atmósfera (Piovano *et al.*, 2014).

El tamaño de las partículas del sedimento es una de las características más importantes para comprender las interacciones sedimento-agua que llevan a la eutrofización de lagos y embalses. La fracción de tamaño de partícula más importante en este proceso es la arcilla o limo fino, en el cual se adsorben minerales, nutrientes (P y N), materia orgánica, microorganismos y carbonatos. Al estudiar un testigo de un cuerpo de agua se podrá también determinar la condición trófica del mismo, evaluar las condiciones climáticas pasadas, la degradación ambiental, así como el diseño y valoración de la eficiencia de medidas de prevención, mitigación y corrección de impactos (IETC, 2001; Escobar *et al.*, 2005).

En este trabajo se presentan parte de los resultados alcanzados en el trabajo de tesis (Degano M.F., 2015) en donde se vincula por primera vez, el relleno sedimentario del Embalse San Roque con la evolución temporal de su estado trófico a través de la evaluación de la variabilidad de datos proxy¹ y la distinción de distintas facies en la columna del testigo.

AREA DE ESTUDIO

El Embalse San Roque se localiza en una región semiárida, en el Valle de Punilla (31° 22' S y 64° 27' O) a 600 msnm, entre las Sierras Grandes y las Sierras Chicas en la provincia de Córdoba (Argentina). 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 es de 16 Km², con un volumen máximo de 190 Hm³ y una profundidad media de 13 m. Recibe el aporte de la cuenca alta de Río Suquía, la cual está conformada por las subcuencas de sus cuatro tributarios: Río San Antonio (505 Km²), Río Cosquín (820 Km²), Arroyo Las Mojaras (85 Km²) y Arroyo Los Chorrillos (160 Km²) (Figura 1); que drenan al embalse, con una superficie total de 1750 Km², siendo su único efluente el Río Suquía (Dasso *et al.*, 2014), que atraviesa la ciudad de Córdoba, escurre por la llanura Chaco-Pampeana y desemboca en un apéndice de la laguna Mar Chiquita, denominado Laguna del Plata con características hipersalinas (Piovano *et al.*, 2006).

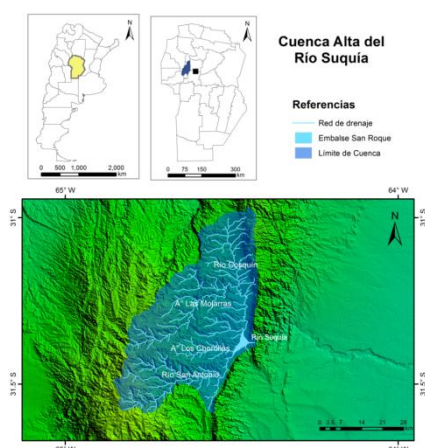


Figura 1: Ubicación del embalse San Roque, tributarios y efluente.

¹ Atributo que permite interpretar, usando principios físicos, químicos y biológicos, las condiciones de un sistema y su comportamiento relacionadas en el tiempo y puede ser cuantificado mediante diversas técnicas analíticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

1-Extracción del testigo y conservación de muestras.

El 25 de setiembre del 2015 se realizó la campaña de monitoreo regular del Embalse San Roque en donde se extrajeron dos testigos de sedimento de aproximadamente 80 cm de largo nominados SR234 I y II, correspondientes al centro del embalse ($31^{\circ} 22' 23''\text{S}$ – $64^{\circ} 27' 58''\text{O}$) (Figura 2). El sacatestigo consiste en un cilindro metálico provisto de un porta testigo y malacate con batería (Figura 3). El porta testigo es un caño de PVC de 6 cm de diámetro por 90 cm de largo, el cual es sellado en ambos extremos luego de extraer la muestra, se rotula y se conserva posteriormente en cámara de frío a 4°C.



Figura 2: Ubicación del sitio de extracción del testigo



Figura 3 Sacatestigo

2-Procesamiento de testigos y análisis de laboratorio.

- *Rayos X*

Se le realizaron radiografías a ambos testigos cerrados (SR234 I y II) en el laboratorio de DASPU (Obra Social Universitaria) para así poder reconocer estructuras sedimentarias.

- *Apertura y registro fotográfico*

El testigo SR234 I fue abierto, separado en mitades y acondicionado para el registro fotográfico necesario para su descripción y análisis.

- *Susceptibilidad Magnética (adimensional).*

La susceptibilidad magnética de un material natural o sintético es una medida de su magnetización en la presencia de un pequeño campo magnético externo (H). Una vez que se elimina el campo aplicado, la magnetización inducida en el material analizado vuelve al estado de magnetización inicial de la sustancia (Lascu, 2009). Cada material posee una susceptibilidad magnética propia, y existe una relación entre el campo magnético y la cantidad de magnetización creada particular. En campos magnéticos débiles la relación es lineal y en campos magnéticos progresivamente más fuertes, tanto en posiciones positivas como negativas, da lugar a un rango de relaciones que van desde lineales (paramagnéticos y diamagnéticos) a curvas no lineales de histéresis (ferrimagnéticos y antiferrimagnéticos) (Lascu, 2009).

La susceptibilidad magnética depende de la concentración de elementos y minerales ferrimagnéticos (Fe, Co, Ni; óxidos de Fe, como magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3), y sulfuros de Fe, como la pirrotita (Fe_7S_8)) (Lascu, 2009), de la composición mineralógica, del tamaño de grano, y de la forma cristalina del mineral ferrimagnético. Estos parámetros son condicionados por el clima (temperatura y humedad), áreas fuentes del material magnético y la distancia a las mismas, condiciones geomorfológicas locales y geoquímicas, litología de los depósitos, y el tiempo, no sólo cronológico sino también como un parámetro relacionado a la evolución del sedimento en estudio. Estos factores están a menudo interrelacionados en una compleja y multi-variable interdependencia (Cohen, 2003). Si bien los valores de susceptibilidad magnética no pueden ser directamente relacionados con cada uno de dichos factores, sí pueden indicar peculiaridades en sedimentos depositados.

Es importante destacar que la susceptibilidad magnética disminuye con el aumento del contenido de agua y que la mayor parte de la magnetización es de origen inorgánico, también puede arrojar valores negativos por el elevado contenido en agua y materia orgánica (Lascu, 2009). La determinación de la susceptibilidad magnética se realizó con un equipo MS2E Bartington con sensor de alta resolución sobre una de las mitades del testigo abierto (SR234 I). Los datos se midieron cada 0,5 cm. Posteriormente se aplicaron correcciones sobre los mismos para evitar el efecto por deriva del instrumento.

- *Descripción macroscópica y muestreo.*

Se realizó una descripción preliminar del testigo en función de sus estructuras sedimentarias primarias (análisis macroscópico) siguiendo los protocolos propuestos por Schnurrenberger *et al.* (2003) y el Centro de Investigaciones Limnológicas (LRC, University of Minnesota, USA, 2011).

Luego se determinaron las distintas facies que fueron enumeradas correlativamente desde el extremo inferior al superior. Se interpretaron las mismas con apoyo del registro fotográfico y radiográfico. A continuación, se efectuó una descripción sedimentológica detallando color, textura, espesor de láminas o capas, estructuras sedimentarias y contactos. La descripción de los contactos entre capas (graduales, difusos, netos, erosivos, irregulares, discordantes, etc.) se realizó en base a los criterios de Schnurrenberger *et al.* (2003). Para descripción de láminas o bandas se siguió el índice de laminación distinguiéndose: laminación continua (láminas de espesor ≤ 2 mm), laminación difusa o discontinua (láminas de 2 a 4 mm de espesor), bandeo fino (capas de 4 a 10 mm de espesor) y bandeo grueso (espesor $>$ a los 10 mm) (Piovano *et al.*, 2002).

Finalmente, se efectuó el muestreo sistemático del testigo cada 1 cm en ciertas zonas y cada 1,5 cm en otras dependiendo de la presencia laminación. Se identificaron un total de 63 muestras que fueron colocadas en envases de plástico para ser liofilizadas.

- *Contenido de humedad (%W)*

La variación del contenido de agua intersticial (% W) se determinó a lo largo de todo el testigo mediante liofilización (“freeze-drying”), que permite la deshidratación total de los sedimentos sin alterar sus componentes orgánicos y los sedimentarios intactos y friables. El proceso consiste en congelamiento a -20°C y posterior deshidratación en liofilizador (RIFICOR R-2).

- *Contenido de materia orgánica (COT) y carbonatos (CIT)*

Se utilizó el método gravimétrico de pérdida por ignición o LOI (Loss of Ignition) (Dean, 1974; Bengtsson y Enell, 1986) para la cuantificación del Carbono Orgánico total (COT) e Inorgánico Total (CIT). Se pesa un mínimo de 0,5 g de muestra liofilizada, molida, homogeneizada y luego se calcina en mufla. Para el COT se lleva a 550°C por 4 horas, se anota su peso y para el CIT a 950°C por 2 horas y ahí se obtiene el peso final, el cual en ambos casos es restado del peso original. El COT se obtuvo multiplicando el LOI_{550} por un factor de 0,5 y el CIT con el LOI_{950} por un factor de 0,273 (Heiri, O., 2001; Bengtsson y Enell, 1986).

- *Análisis granulométrico*

Primero se le realizó un pretratamiento a la muestra para eliminar la materia orgánica y los carbonatos según Vaasme (2008). Se colocaron 0,2 g de muestra liofilizada en tubo de centrifuga y se le adicionó a cada muestra pirofosfato de sodio (para evitar la formación de flóculos) durante 24 horas, luego se realizaron tres lavados con agua destilada y centrifugación. Posteriormente, se agregó 15 ml agua oxigenada al 30% por 24 hs, se lavó, centrifugó y por último se agregó ácido clorhídrico al 10% por 24 hs. Se lavó, centrifugó y midió en el analizador de partículas HORIBA LA950. Se utilizó para su interpretación la escala granulométrica de Udden-Wentworth y su equivalencia a la escala Phi.

- *Análisis de Fósforo total*

A lo largo del testigo SR234 I se seleccionaron 15 muestras que fueron en función de la presencia de laminillas o variaciones macroscópicas. Se pesó apróx. 0.1g de sedimento y se llevó a digestión ácida a temperatura ambiente, según la técnica de Naquadat (1979) y luego se realizó la técnica colorimétrica del Ácido ascórbico (SM 4500 P E, 2005).

3- Estimación cronológica

Se propuso un marco cronológico para el testigo, mediante la tasa de sedimentación mínima estimada en 0,6 cm/año. Los 80 cm del testigo, se tomaron como el total de sedimento depositado durante los 127 años que tiene el embalse (desde 1888 a 2015). Con estos datos se realizó la extrapolación de esta tasa permitiendo asignar edades a las diferentes unidades sedimentarias. Si bien se asumió una tasa de sedimentación constante, se sabe que la misma puede fluctuar en el tiempo por las precipitaciones, deforestaciones, incendios, actividad minera, etc., existentes en la cuenca.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

- *Descripción de facies*

Una litofacies es un cuerpo de roca con características específicas. Puede ser una sola capa o un grupo de múltiples capas. Idealmente, se trata de una roca o sedimentos distintivos formados bajo ciertas condiciones de sedimentación, reflejando un proceso, arreglo sedimentario o ambiente particular. Las facies pueden ser divididas en subfacies o agrupadas en asociaciones de facies. En un testigo sedimentario, una facies puede ser definida en función del color, laminación, composición, textura, fósiles y estructuras sedimentarias. De esta forma, se definen facies en un sentido descriptivo (*ej.* Facies de limos oscuros). También pueden ser definidas según un sentido genético (*ej.* Facies de turbiditas), es decir, en función del proceso por el cual se considera que se generó, o en un sentido ambiental (*ej.* Facies fluviales) en función del ambiente en el que se interpreta que fue depositada (Reading, 2000). En el presente trabajo, sólo se determinó en sentido descriptivo.

Es importante destacar que la integración de los resultados de los diferentes indicadores *proxies* (%W, susceptibilidad magnética, COT, CIT, granulometría y las estructuras del sedimento) y los cambios en las facies sedimentarias proporciona una sólida base para la interpretación de los registros paleolimnológicos estudiados. Se identificaron 3 facies que se explican a continuación:

Facies A (de fangos laminados a macizos): Se extiende desde la base del testigo (80 cm) hasta los 38 cm. Los valores obtenidos son los indicados en la Tabla 1. La susceptibilidad magnética es un atributo que permite diferenciar a esta facies, debido a que es positiva en toda su extensión. La granulometría es uniforme, clasificada dentro de limo fino, con un pico de granulometría más gruesa. El marco cronológico propuesto permite acotar la formación de esta facies entre los años 1888 y 1955. Las precipitaciones (según el Sistema Meteorológico Nacional - SMN) para este período presentaron un máximo anual de 1013 mm, un mínimo anual de 398 mm con un promedio anual de 691,6 mm.

Tabla 1: Valores de los multi-indicadores de la Facies A

Proxy		Facies A	Proxy		Facies A
%W	Máx.	69,6	CaCO ₃ (CIT)	Máx.	0,7
	Mín.	53,6		Mín.	0,5
	Mediana	63,8		Mediana.	0,6
M.O. (COT)	Máx.	10,3	Granulom. (Phi)	Limo Fino	6,6
	Mín.	5,7		Limo Grueso	4,3
	Mediana	7,4		Mediana	6,2

Facies B (de fangos macizos a laminados): Se encuentra desde los 38 cm hasta los 18,7 cm. Se caracteriza por la alternancia de sets de láminas con intervalos macizos y láminas difusas. Los valores obtenidos son los indicados en la Tabla 2. Desde los 33 cm el sedimento comienza a tener un olor particular y más concentrado que en el resto del testigo. La granulometría está dentro de limo fino, con algunos picos hacia limo grueso. La susceptibilidad se estima cercana a cero ya que las mediciones fueron mayormente números negativos por el alto contenido en agua y materia orgánica. El marco cronológico propuesto permite ubicar la formación de esta facies entre los años 1955 y 1985. Según el SMN, las lluvias registradas para el momento de la deposición de la facies B tuvieron un máximo de 1174 mm, un mínimo de 484,7 mm siendo el promedio anual 839 mm.

Tabla 2: Valores de los multi-indicadores de la Facies B.

Proxy		Facies B	Proxy		Facies B
%W	Máx.	74,2	CaCO ₃ (CIT)	Máx.	0,7
	Mín.	65,6		Mín.	0,6
	Mediana	69,1		Mediana	0,7
M.O. (COT)	Máx.	9,4	Granulom. (Phi)	Limo Fino	6,4
	Mín.	6,5		Limo Grueso	5,2
	Mediana	7,5		Mediana	6,1

Facies C (fangosa, con material macizo y gelatinoso): Se extiende desde los 18,7 hacia el extremo superior del testigo. La cantidad de agua es mayor que en las otras facies, esto provoca que la susceptibilidad magnética sea negativa. La granulometría está dentro de limo fino y es totalmente uniforme. Los valores obtenidos son los indicados en la Tabla 3. El marco cronológico propuesto permite acotar la formación de esta facies entre los años 1985 y 2015. Las precipitaciones máximas registradas en esta facies tienen un valor de 1317 mm, las mínimas 550 mm y un promedio de 817,1 mm (anual/facies).

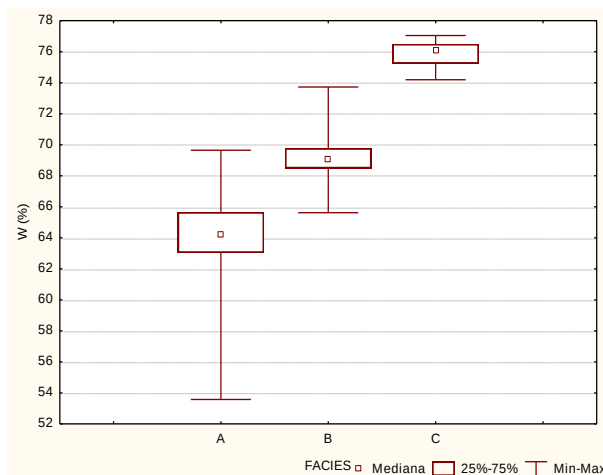
Tabla 3: Valores de los multi-indicadores de la Facies C

Proxy		Facies C	Proxy		Facies C
%W	Máx.	77	CaCO ₃ (CIT)	Máx.	0,7
	Mín.	74.9		Mín.	0,5
	Mediana	75.7		Mediana	0,6
M.O. (COT)	Máx.	8.1	Granulom. (Phi)	Limo Fino	6,3
	Mín.	6.5		Limo Grueso	
	Mediana	7.3		Mediana	6,3

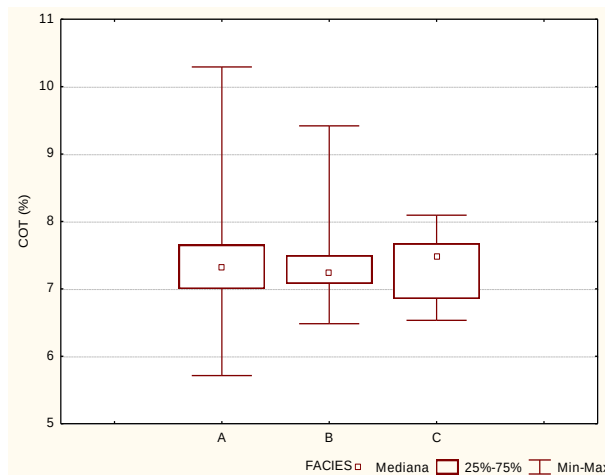
- *Relaciones estadísticas de los proxies analizadas*

Se relacionan los *proxies* de cada facies y se puede observar de manera gráfica las variaciones de cada uno con respecto a las otras dos facies. En los Box Plot se encuentran representados los rangos, la mediana, los valores atípicos (outliers) y los extremos de cada *proxy* en cada facies (Figura 4 A, B, C y D).

En la Figura 4A se observa %W de cada facies, cuya mediana aumenta progresivamente de la facies A a la C y su rango se hace más estrecho. La relación entre el porcentaje de materia orgánica o COT se observa en la Figura 4B, donde se puede interpretar que los valores de mediana son similares en todas las facies, si bien se observan mayores valores extremos en la facies A. En la Figura 4C está caracterizado el porcentaje de CIT, donde se observa mayores valores en A y B con respecto a C. En cuanto a la susceptibilidad magnética se observa que posee mayores valores positivos en la facies A y mínimos en B y C.



A



B

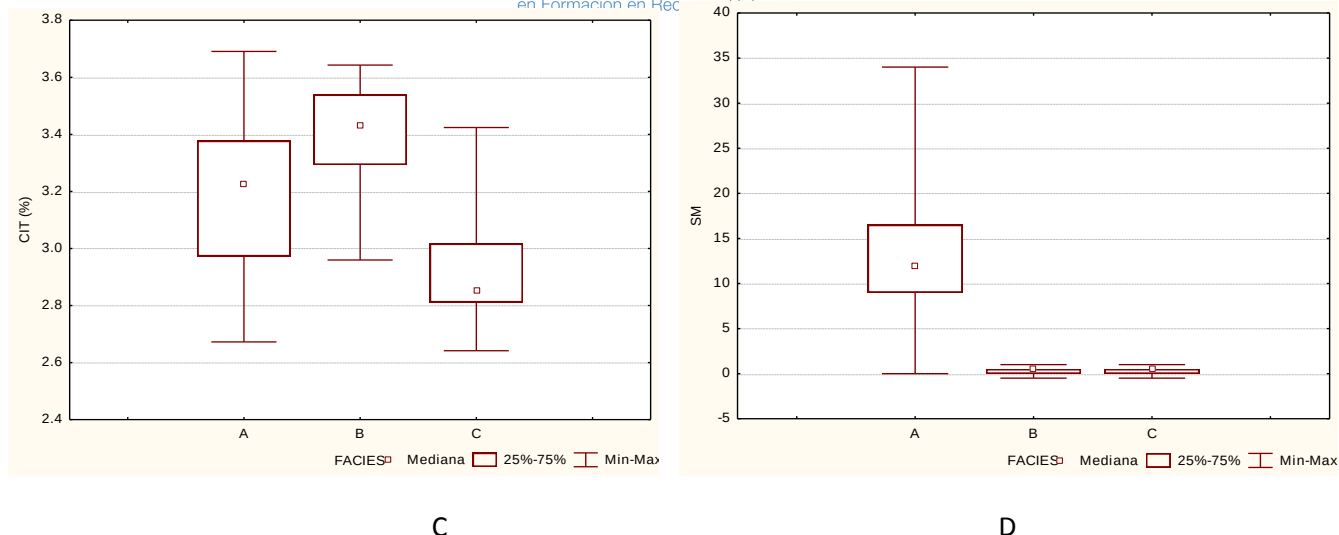


Figura 4: Box plot. (A) %W (B) COT (C) CIT (D) SM.

En la Tabla 4 se observan los coeficientes de correlación de los *proxies* determinados para el testigo SR234 I. Se observa una lógica asociación significativa y de signo negativo entre la profundidad y el porcentaje de agua. A medida que la profundidad aumenta, disminuye la cantidad de agua. En lo que respecta a la susceptibilidad magnética, tiene una correlación positiva con la profundidad y negativa con el porcentaje de agua. No se observa asociación entre el resto de las variables.

Tabla 4: Coeficiente de correlación de las distintas variables (Spearman, $p < 0,05$)

	Prof. (cm)	%W	% COT	% CIT	SM
Prof. (cm)	1.00	-0.92*	0.03	0.03	0.69*
% W	-0.92*	1.00	-0.10	0.02	-0.67*
% COT	0.03	-0.10	1.00	-0.16	0.002
% CIT	0.03	0.02	-0.16	1.00	-0.09
SM	0.69*	-0.67*	0.002	-0.09	1.00

- *Materia orgánica y carbonatos*

Existen relaciones entre la materia orgánica y el carbonato de calcio en lagos y embalses, en esta dinámica compleja la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) principalmente calcita, puede ser inducida por factores bióticos y abióticos como cambios en la temperatura, el metabolismo bacteriano y el estado trófico del cuerpo de agua (Sosa-Nájera *et al.*, 2010). En los lagos templados la sedimentación química de calcita es principalmente bioinducida (Kelts y Hsü, 1978). La circulación vertical del agua que ocurre al final de la primavera y del verano produce un aporte de nutrientes desde el hipolimnion, desencadenando la proliferación o *bloom* algal. La fotosíntesis asociada a este aumento en la producción primaria del lago provoca un gran consumo del CO_2 disuelto que afecta el equilibrio del sistema de los carbonatos generando un aumento de pH y la concentración de CO_3^{2-} . Esto último favorece la aparición de condiciones de sobresaturación y la consecuente precipitación de calcita (Walker, 1984). Este ciclo, cuando es de carácter anual, se refleja por la alternancia de láminas de calcita precipitadas durante el *bloom* algal (primavera-

verano) y láminas oscuras constituidas por restos de materia orgánica y arcillas (otoño-invierno) (Walker, 1984).

En el Embalse San Roque se ha observado que las variaciones en la concentración de Ca están sujetas a procesos de solubilización y precipitación (descalcificación epilimnética). Durante el verano, en superficie se registran condiciones de sobresaturación de carbonato de calcio lo cual puede asociarse con el aumento de temperatura y de pH. La fotosíntesis de las algas planctónicas provoca una elevación del pH que induce a la precipitación de CaCO_3 . En el hipolimnion se registran condiciones de subsaturación con valores negativos del Índice de Saturación (Rodríguez, 2002).

Observando las variaciones de COT y CIT, se puede inferir que estos ciclos se pueden dar también de carácter anual o durante varios años, es decir que existan años con mayor productividad que otros, donde inicialmente habría una mayor precipitación de carbonatos. Posteriormente, al morir las algas y sedimentar, estos eventos de alta productividad como son las floraciones, podrían quedar registrados en los sedimentos denotados en un mayor porcentaje de COT y menor de CIT.

- *Interpretación del testigo y estimaciones cronológicas (Figura 5)*

Facies A: En esta facies se encuentra la mayor deposición de materia orgánica (aprox. el año 1900) producto de una elevada actividad biológica, coincidente con un bajo volumen del embalse, ya que se había llenado recientemente y habría una gran cantidad de cobertura vegetal anegada. Se registra en oposición, un pico de menor porcentaje hacia 1922, pudiendo ser por una disminución del contenido de material biológico. Se observan valores especulares entre el contenido de COT y de CIT. Cuando el CIT es elevado y el COT bajo podría asociarse a un bloom algal, por lo que en ese momento precipitaron carbonatos, que se encuentran en el registro sedimentario (ciclo más productivo), en un contexto de precipitaciones escasas o sequía. Años después se encuentra un elevado porcentaje de materia orgánica, correspondiente a la muerte y posterior deposición de las algas de ese ciclo productivo. También los valores de pH, temperatura y oxígeno disuelto del agua deben haber sido propicios para su preservación en los sedimentos de fondo. En esta facies las precipitaciones son menores que en las otras dos. Se trata una facies de limos laminados, depositados por decantación.

Facies B: Se detectan valores especulares de COT y CIT, al igual que en la facies anterior, cuya interpretación de formación es similar. La disminución significativa de la susceptibilidad magnética es atribuible a un aumento importante en el porcentaje de agua y de materia orgánica. Es importante destacar la presencia de laminación (con láminas más oscuras y más claras), siendo las más oscuras debido a un mayor porcentaje de materia orgánica que en las más las más claras.

Facies C: Representa el período más reciente. La materia orgánica, en general, aumenta progresivamente al igual que el porcentaje de agua (susceptibilidad magnética cercana a cero), distinto de los carbonatos, que presentan una tendencia de disminución, con dos picos máximos en 1998 y 2006 que pueden asociarse a la

acumulación de algas, y a que no se generaron condiciones propicias para la precipitación. La estructura es maciza y gelatinosa debido al gran porcentaje de agua que acumulan estos limos.

- *Fósforo total*

Los valores de medianas obtenidos para cada Facies se muestran en la Tabla 5. El rango de variación fue de 610 a 2017 $\mu\text{g P/g}$ de peso seco. Desde 1888 (construcción del embalse) la concentración se mantuvo constante hasta aproximadamente 1955, donde se observa un incremento abrupto, luego disminuye y permanece constante hasta 1984 que comienza a aumentar progresivamente hasta la actualidad, siendo en 2015 el pico máximo encontrado, probablemente influenciado por encontrarse en la interfaz sedimento-agua y el aumento de la población en el departamento de Punilla y la contaminación antrópica (Figura 5).

Tabla 5: Valores de PT por Facies

$\mu\text{g P/g}$ peso seco	Facies A	Facies B	Facies C
Mediana	1463	1073	1114
Máx.	2017	1142	1422
Mín.	1375	1006	1064

En la Figura 5 se observan las facies representativas y la variación de proxies del testigo SR234 I.

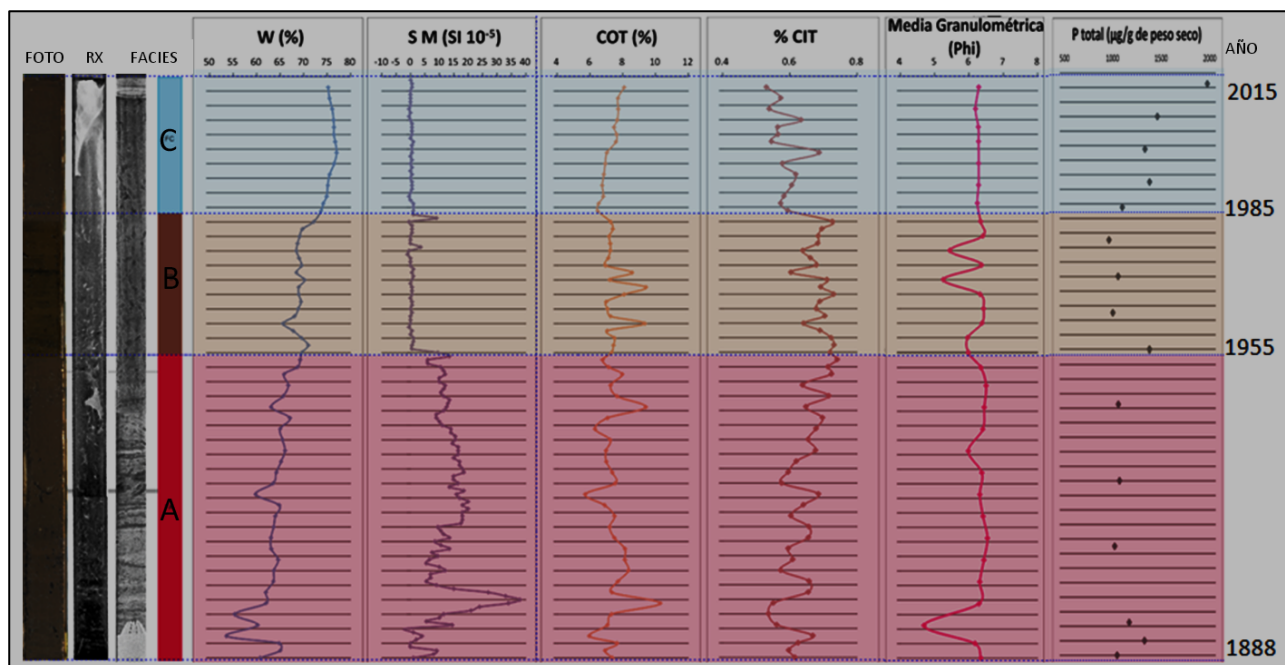


Figura 5: Datación estimativa del testigo SR234 I

CONCLUSIONES

Los análisis multiproxies (%W, COT, CIT, susceptibilidad magnética) permitieron definir tres facies dentro del registro sedimentario: la facies A o *de fangos laminados a macizos*, la facies B o *de fangos macizos a laminados*, y la facies C o *fangosa, con material macizo y gelatinoso*.

La relación especular entre COT y CIT puede explicarse por la alternancia entre ciclos productivos y no productivos de algas.

Al observar los valores de Fósforo total y de materia orgánica, se puede afirmar que la eutrofización del embalse ha ido en aumento progresivo, principalmente en los últimos 30 años. El aumento de la población y el consecuente aumento en el vertido de efluentes desde la fundación del embalse se ven reflejados en el incremento en los contenidos de fósforo total del sedimento que actúa como sumidero.

La calidad del agua del embalse y su estado de eutrofia, hace que sea indispensable su seguimiento y control, ya que es una importante reserva de agua dulce para el consumo de la población de Córdoba capital y otras localidades de la provincia. Actualmente, no existen antecedentes de estudios paleolimnológicos como el aquí presentado en embalses en Argentina, y se considera que la profundización de estos estudios pueden aportar información muy relevante para la gestión del recurso, sus sedimentos y cuenca.

REFERENCIAS

APHA, AWWA & WEF (2005). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 21st Edition. American Public Health Association, Washington D.C.

Bengtsson, L. y Enell, M. (1986). "Chemical analysis. In: Berglund B.E. (ed.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*" - John Wiley & Sons Ltd, Chichester - pp. 423–451.

Brenner, M., et al. (2002). "Limnología y Paleolimnología de Peten, Guatemala" - Revista Universidad del Valle de Guatemala, 12 - pp. 2-9.

Cohen, A. S. (2003). "Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems" – Oxford University Press – New York.

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" – Relatorio del XIX Congreso Geológico de Córdoba– Págs. 1209 a 1231. Tomo II.

Dean, W.E. (1974). "Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods" - J. Sed. Petrol. 44: 242–248.

Degano M.F. (2015). "Paleolimnología del embalse San Roque (Córdoba, Argentina) y estudio de la evolución de su condición trófica". Tesis de grado de la carrera de Geología de la Universidad Nacional de Córdoba.

Escobar, J.; Restrepo, J.C. y Martínez, J.I. (2005). "La paleolimnología como herramienta para el estudio y manejo de embalses" - vol. 8 - Núm. 2 - pp. 51-59 - Universidad Nacional de Colombia - Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Sistema de Información Científica.

Heiri, O.; Lotter, A.F. y Lemcke, G. (2001). "Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results" – J. Paleolim. 25: 101–110.

International Environmental Technology Centre (IETC) (2001). "Planificación y manejo de lagos y embalses: una visión integral de la eutrofización" - Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. División de Tecnología, Industria y Economía – Versión abreviada – Impreso en Osaka, Japón - 67 pp.

Kelts, K. y Hsü K.J. (1978). "Freshwater carbonate sedimentation" - En: A. Lerman, (Ed), *Lakes: Chemistry. Geology and Physics*. Springer-Verlag, pp. 295-323.

- Lascu, I. (2009).** *"Magnetic susceptibility logging for cores"* – Version 1.0 - Limnological Research Center Core Facility – SOP series.
- Last, W.M. (2002).** *"Geolimnology of salt lakes"* - Geosciences Journal - 6:347-369.
- Limnological Research Center - LRC, University of Minnesota, USA, 2011.** <http://lrc.geo.umn.edu>
- Naquadat (1979).** Analytical Water Manual- Ottawa- Canadá (National Quality Data Bank).
- Piovano, E.; Damatto Moreira, S. y Ariztegui D. (2002).** *"Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (Central Argentina): A sedimentary model for a highly variable saline lake"*- Sedimentology 49:1371-1384.
- Piovano E. L.; Zanor, G. A. y Ariztegui, D (2006).** *"Marco geológico general. En: Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina)"* - (ed. Bucher E.H.) - pp. 29-35. Academia Nacional de Ciencias (Córdoba, Argentina).
- Piovano, E. L.; Córdoba, F. E. y Stutz, S. (2014).** "Limnogeology in Southern South America: An Overview" - Latinamerican Journal of Sedimentology and Basin Analysis - Vol. 21(2) - Págs: 65-75 - Asociación Argentina de Sedimentología - ISSN 1851-4979.
- Quirós R. y Drago E. (1999).** *"The environmental state of Argentinian lakes: An overview"*– Lakes and Reservoirs: Research and Management – 4: 55-64.
- Reading, H. G. (2000).** *"Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy"* - Department of Earth Sciences, University of Oxford. 688 pp.
- Rodriguez, M.I. (2002).** *"Análisis de la Composición Iónica de las Aguas del Embalse San Roque (Cba)"* – Informe de beca.
- Rodriguez, M.I.; Bustamente, M.A.; Ruibal, A.L.; Ruiz M.A. y Busso, F. (2008).** *"Estudio del fitoplancton en el marco de monitoreo del Embalse San Roque (Cba)"*- IV Congreso Argentino de Limnología. San Carlos de Bariloche – 14 págs.
- Schnurrenberger, D.; Russell, J. & Kelts, K. (2003).** *"Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components"*– Journal of Paleolimnology 29: 141–154.
- Sosa-Nájera, S.; Lozano-García, S.; Roy, P.D. y Caballero, M. (2010).** *"Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres: El caso del lago de Santa María del Oro"* - Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana – 62 (3) – pp 437-451.
- Vaasme, Tiit (2008).** *"Grain size analysis of lacustrine sediments: a comparison of pretreatment methods"* - Estonian Journal of Ecology - pp 231 – 243.
- Walker, R. G. (Ed.) (1984).** *"Facies models"* - Canada: Geological Association of Canada.
- Williams, M.A.J.; Dunkerley, D. L.; De Deckker, P.; Kershaw, A. P. & Stokes T. J. (1993).** *"Quaternary Environments"* - Edward Arnold – Great Britain - pp 330.