

# Modelo conceptual del funcionamiento del embalse San Roque: dinámica sedimentaria y geoquímica

Nathalie Pussetto<sup>1,3</sup>, Eduardo L. Piovano<sup>1,2</sup>, María I. Rodríguez<sup>3</sup>, Marcia Ruiz<sup>3</sup> y Silvana R. Halac<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

<sup>2</sup> CICTERRA (UNC-CONICET), Argentina

<sup>3</sup> INA – CIRSA, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 19/12/2019

Fecha de aceptación del manuscrito: 05/10/2020

Fecha de publicación: 31/10/2020

**Resumen**— La eutrofización representa una importante problemática ambiental que ocasiona un deterioro en los sistemas acuáticos. El estudio del registro sedimentario de un cuerpo de agua eutrófico, el embalse San Roque (Córdoba, Argentina), constituye una importante fuente de información en el entendimiento de dicho proceso y del papel que cumplen los sedimentos en la eutrofización. Con este propósito se caracterizó la distribución espacial de la granulometría y composición geoquímica de los sedimentos de fondo obtenidos en dos muestreos llevados a cabo en junio y agosto de 2018. Los resultados indican que la distribución granulométrica responde principalmente al aporte fluvial del ESR. Las fracciones gruesas predominan en proximidades a las desembocaduras y las fracciones finas en las zonas profundas del embalse. Adicionalmente los mayores contenidos de fósforo inorgánico, hierro, manganeso y carbono orgánico total se hallaron en la zona de la garganta, probablemente asociados en el sedimento. Por otro lado, las mayores concentraciones de fósforo orgánico y carbono inorgánico total se localizaron en el área central, relacionados con procesos biogeoquímicos, mientras que los mayores contenidos de nitrógeno inorgánico total se presentaron en el punto de influencia del río Cosquín y arroyo Las Mojarras, probablemente de origen antrópico.

**Palabras clave**— eutrofización, sedimentos, distribución espacial.

**Abstract**— Eutrophication is an important environmental problem that affects the aquatic systems, causing a deterioration in water quality. The study of uppermost sedimentary record of the eutrophic San Roque reservoir (SRr; Córdoba, Argentinian), allows the understanding of the role that sediments play in the eutrophication process. This work characterized the spatial distribution of particle size and geochemical composition of the sediment obtained in two samplings carried out in June and August 2018. Our results show that the particle size distribution responses mainly to the sedimentary river dynamics in SRr. Coarse fractions were mainly present in the areas near the rivers mouths, while fine fractions prevailed in the deep areas. In addition, most part of inorganic phosphorous, iron, manganese and total organic carbon were located in the throat of the reservoir, probably associated in the sediment. On the other hand, higher organic phosphorous and inorganic carbon content were found in the central area, related with biogeochemical process, whereas inorganic nitrogen was higher at the confluent point of Cosquín river and Las Mojarras stream, probably from anthropic origin.

**Keywords**— Eutrophication, sediment, spatial distribution.

## INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la evidencia ha demostrado que en el Sistema Tierra están ocurriendo cambios ambientales de manera acelerada. El desencadenante principal de este aceleramiento, entendido como una actividad externa a la natural, es el forzante antrópico. El accionar de los seres humanos sobre el planeta ha sido tan notable, especialmente en el último siglo, que no existe ecosistema que no esté afectado por su actividad (Crutzen, 2006; Duarte *et al.*, 2006).

Un proceso que afecta a los sistemas acuáticos del mundo es la eutrofización. Su causa principal es el aporte de nutrientes, especialmente nitrógeno (N) y fósforo (P), a un sistema acuático. A pesar de que este proceso es generado lentamente de manera natural, en el presente se encuentra acelerado debido a la influencia antrópica (Davidson, 2013).

La contaminación antrópica o cultural generada sobre estos sistemas se debe principalmente al vertido de desechos de las actividades humanas a los cuerpos de agua. Las riberas de los sistemas lacustres son generalmente puntos de asentamiento de centros urbanos y, frecuentemente, sitios de fácil depositación de residuos y vertido de efluentes. Por ello, es frecuente que los sistemas acuáticos urbanos presenten procesos de deterioro y eutrofización relativamente rápidos e intensos.

El incremento de nutrientes en un sistema acuático origina una de las principales consecuencias de la

Dirección de contacto:

Pussetto Nathalie, Av. Ambrosio Olmos 1142, X5000 Córdoba, Tel: 0351 468-2781, nathalie.pussetto@hotmail.com

eutrofización, el desarrollo de floraciones algales. Este evento se produce por la multiplicación masiva de distintas especies, especialmente de cianobacterias, las que pueden liberar toxinas y ocasionar la generación de olores y sabores desagradables en el agua (Chorus y Bartram, 1999; O’Neil *et al.*, 2012; Aguilera *et al.*, 2018).

Debido a que los sedimentos constituyen una reserva de componentes biodisponibles, tales como la materia orgánica y nutrientes, el retorno de éstos últimos hacia la columna de agua representa una “fertilización interna” del sistema y el resultado se visualiza en un aumento de la eutrofización. A partir de esto, analizar el rol que cumple el relleno sedimentario es significativo para el entendimiento del proceso.

A pesar de la importancia del estudio de los procesos operantes en la eutrofización de los embalses, existen pocos trabajos que aborden esta problemática a través del estudio de la composición sedimentaria. Algunos estudios previos de los sedimentos del embalse San Roque aportan conceptos importantes sobre diferentes aspectos de esta temática (Santa y Herrero, 1979; Granero *et al.*, 2004; Ruiz *et al.*, 2005; Borgnino *et al.*, 2006; Degano *et al.*, 2016; Córpora *et al.*, 2018). Sin embargo, la integración de los diferentes procesos operantes en la dinámica sedimentaria en un modelo sencillo no ha sido aún abordada.

El presente trabajo tiene como objetivo aportar en el entendimiento de la dinámica sedimentaria y geoquímica del embalse San Roque y su relación con el proceso de eutrofización a partir de la elaboración de un modelo conceptual que integre y sintetice los procesos intervinientes.

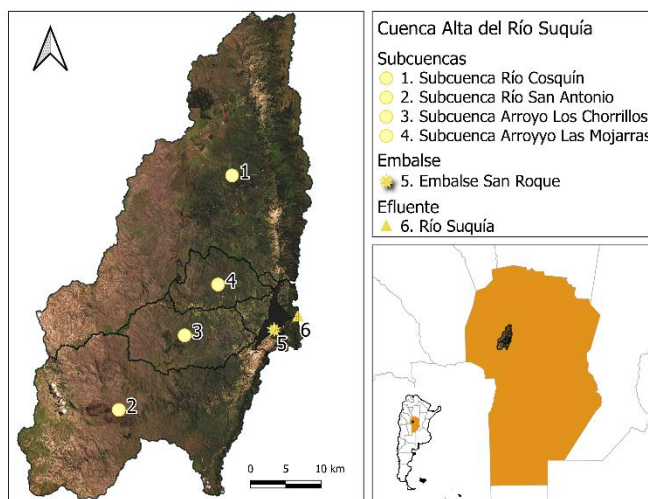
**ÁREA DE ESTUDIO**

El sitio de estudio comprende el embalse San Roque (ESR; 31° 22' 33.72" S 64° 28' 2.10" O), situado en el Valle de Punilla, centro oeste de la provincia de Córdoba a 608 msnm, entre las Sierras Grandes y las Sierras Chicas. Es un cuerpo de agua artificial cuya cuenca de aporte es la cuenca alta del río Suquía, de un área de aproximadamente 1750 km<sup>2</sup>, la cual está conformada por las subcuencas de los cuatro tributarios que desembocan en el embalse (Fig 1): subcuenca del río San Antonio (515 km<sup>2</sup>), subcuenca del río Cosquín (827 km<sup>2</sup>) subcuenca del arroyo Las Mojarras (89 km<sup>2</sup>) y subcuenca del arroyo Los Chorrillos (138 km<sup>2</sup>).

Los procesos de sedimentación en el ESR se encuentran controlados principalmente por el aporte fluvial a partir de procesos erosivos y de meteorización (Pasquini *et al.*, 2006) de las rocas ígneas y metamórficas del basamento cristalino (Gordillo y Lencinas, 1979; Martino y Guerreschi, 2014), así como también de la erosión de los suelos de la región. Estos procesos son influenciados por el régimen de precipitación, deforestación, incendios, entre otros, presentes en la cuenca (Aragañaz *et al.*, 2015; Salgado, 2015). Además de la carga del material sedimentario, existe un aporte directo de nutrientes y contaminantes de origen antrópico, proveniente de ciudades turísticas asentadas en la cuenca del ESR (Ruibal *et al.*, 1999; Granero *et al.*, 2004; Rossen *et al.*, 2007; Rodríguez y Ruiz, 2016; Halac *et al.*, 2020).

Debido a los usos múltiples del ESR, el estudio sobre la problemática de eutrofización adquiere gran relevancia. Este embalse es utilizado principalmente como fuente de abastecimiento de agua potable para el 70% de los habitantes de la ciudad de Córdoba y adicionalmente para

generación de energía hidroeléctrica, aporte hídrico para riego, control de inundaciones y para el desarrollo de



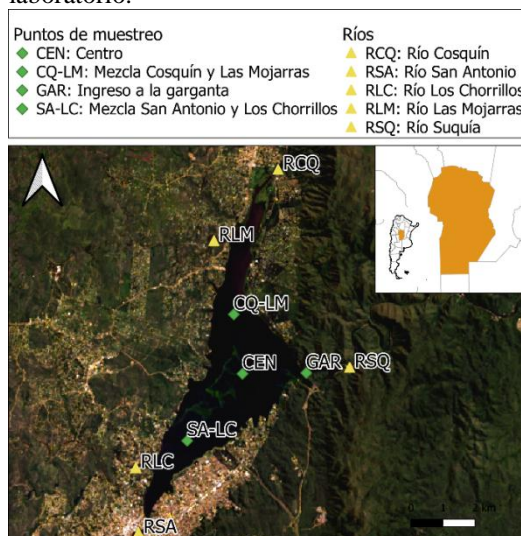
diversas actividades recreativas (Nadal *et al.*, 2012; Rodríguez y Ruiz, 2016).

**Figura 1:** Ubicación del área de estudio: ESR y las subcuencas que integran la cuenca alta del río Suquía.

**MATERIALES Y MÉTODOS**

**Extracción de muestras de sedimentos**

La extracción de las muestras de sedimentos se realizó en cuatro sitios de muestreo en el ESR (Fig. 2): CQ-LM (zona de influencia del río Cosquín y arroyo Las Mojarras), SA-LC (zona de influencia del río San Antonio y arroyo Los Chorrillos), y los sitios de la zona profunda del embalse CEN (centro) y GAR (garganta) los días 26/06/2018 y 06/08/2018. El instrumento utilizado para la toma de sedimentos fue un muestreador tipo “Gravity Corer” (Fig. 3), con el cual se tomaron sedimentos en cada uno de los sitios hasta una profundidad de 8 cm. El sedimento extraído fue submuestreado en campo cada 1 cm. Las muestras fueron almacenadas en bolsas, previamente rotuladas y conservadas en frío para su posterior transporte al laboratorio.



**Figura 2:** Puntos de muestreo en el ESR.

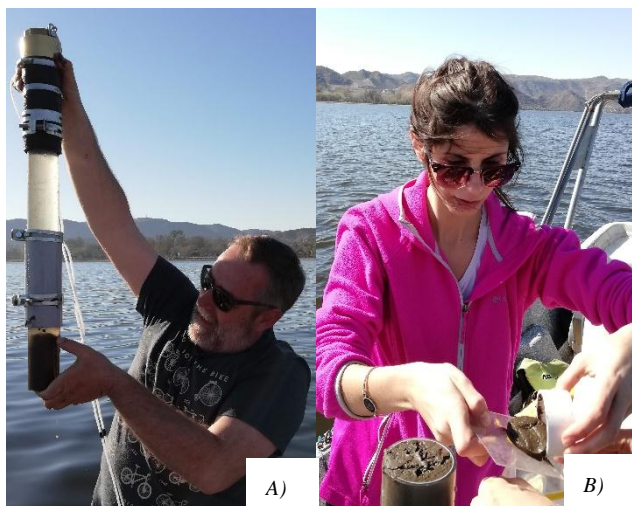


Fig. 3: Toma de muestras de sedimentos. A) Equipo muestreador con sedimento extraído del ESR. B) Submuestreo del sedimento.

### Procesamiento de muestras

#### Determinación analítica de N, P, Fe y Mn.

Las determinaciones analíticas de nitrógeno inorgánico total (NIT), fósforo total (PT), fósforo inorgánico (PI), fósforo orgánico (PO), hierro total (FeT) y manganeso total (MnT) fueron realizadas en los laboratorios de la planta potabilizadora Suquía de Aguas Cordobesas S.A, según Standard Analytical Methods (APHA, 2017; Córpora *et al.*, 2018).

Los contenidos de PI y PT fueron determinados por el método del Ácido L-ascórbico (SM 4500-P E), mientras que el PO se estimó por diferencia entre ambas fracciones. FeT y MnT se midieron por espectrometría de absorción atómica (EAA) con atomización por llama y NIT fue determinado según el método colorimétrico (SM 4500, B) utilizando un autoanalizador de flujo continuo por aire y un cromatógrafo de intercambio aniónico.

#### Estimación del contenido de Carbono Orgánico Total (COT) y Carbono Inorgánico Total (CIT)

La estimación de COT y CIT se realizó en el laboratorio de Análisis de Cuencas Sedimentarias (FCEFYN-UNC), según el método de Pérdida por Ignición o LOI (Loss on Ignition), siguiendo la metodología descrita por Heiri *et al.*, (2001) y Dean, (1974). Las muestras previamente secadas en estufa fueron sometidas a dos etapas de calcinación en mufla. En una primera instancia se llevaron a una temperatura de 550°C durante 4 h, para la combustión de la materia orgánica (MO), y en una segunda etapa se llevaron a una temperatura de 950°C durante 2 h, para la destrucción de los carbonatos. La pérdida de peso ocurrida en cada una de las etapas se traduce al contenido de COT y CIT, respectivamente, según las fórmulas (1) y (2):

$$COT (\%) = 0,50 * LOI_{550} \quad (1)$$

$$CIT (\%) = 1,36 * LOI_{950} \quad (2)$$

Donde,

$$LOI_{550} (\%) = ((PM_{sec} - PM_{550}) / PM_{sec}) * 100 \quad (3)$$

$$LOI_{950} (\%) = ((PM_{550} - PM_{950}) / PM_{sec}) * 100 \quad (4)$$

Siendo,

LOI<sub>550</sub> (3) y LOI<sub>950</sub> (4): pérdida de peso (%) a 550°C y a 950°C respectivamente.

PM<sub>sec</sub>: peso (g) de la muestra secada en la estufa antes de la combustión.

PM<sub>550</sub> y PM<sub>950</sub>: peso (g) de la muestra después de la combustión a 550°C y a 950°C respectivamente.

#### Determinación del tamaño de partícula

La determinación del tamaño de partícula se realizó en el LabGeo (FCEFYN-UNC), utilizando el analizador Horiba LA-950. Previo al análisis se aplicó el pretatamiento de las muestras descrito por Vaasma (2008), para el cual se utilizó H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% V/V como oxidante de la MO y HCl al 10% V/V para la eliminación de carbonatos.

Pretatamiento realizado:

1) Se añadió inicialmente H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% en alícuotas, hasta un total de 26 mL por muestra.

2) Se centrifugaron a 3500 rpm durante 15 min y se extrajo el sobrenadante de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

3) Se realizó un lavado con agua RO y se centrifugaron a 8000 rpm durante 5 min. A continuación, se extrajo el sobrenadante de agua destilada. Este procedimiento se repitió tres veces.

4) Se agregó 10 mL de HCl al 10% y posteriormente se realizó el proceso de centrifugado, extracción y lavado.

5) Se colocó una pequeña fracción de muestra en tubos Eppendorf y se les adicionó a cada una solución de pirofosfato de sodio para lograr la dispersión de los sedimentos.

Los resultados obtenidos se agruparon en porcentajes de clases texturales presentes, tomando como referencia para esta clasificación la Escala Granulométrica de Udden Wentworth (Wentworth, 1922).

### Procesamiento de datos

#### Elaboración de mapas

Los resultados obtenidos fueron representados en mapas de contorno, que permitieron graficar la distribución de las diferentes variables analizadas (tamaño de partícula, PT, PI, PO, NIT, CIT, COT, FeT y MnT) en el espacio. Para esto fue utilizado el programa computacional de gráficos de superficie (Surfer 10) el que, mediante el método Kriging, interpola datos XYZ. Los mapas creados representan la distribución promedio de los 8 cm superiores del relleno sedimentario.

#### Análisis de datos

Para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en la granulometría y contenido de nutrientes entre los sitios, se aplicaron análisis de la varianza (ANAVA) y Test de Tukey ( $p \leq 0,10$ ). Por otro lado, se realizó un análisis de correlación de Pearson ( $p \leq 0,01$ ) entre el total de las variables determinadas en el sedimento. Para dichos análisis se utilizó el programa computacional InfoStat (Di Rienzo, 2012).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Distribución espacial de los indicadores analizados*

El análisis espacial de las variables fue realizado a partir de mapas de contorno, que representan sus distribuciones en el sedimento superficial, y ANAVAS, para detectar diferencias entre sitios de muestreo del ESR.

#### **Tamaño de partícula**

Con respecto a la distribución espacial de las clases texturales en los sedimentos del ESR, se observó que los contenidos más bajos de la fracción arcilla, inferiores al 1%, se distribuyeron en las zonas próximas a las desembocaduras (SA-LC y CQ-LM), con un aumento progresivo del mismo hacia la zona de la garganta (GAR) donde las proporciones resultan significativamente mayores ( $p \leq 0,10$ ), alcanzando el 5% (Figura 4A). La abundancia de la fracción limo resultó homogénea con contenidos por encima del 80% en las muestras de todos los sitios analizados, asimismo su concentración fue significativamente mayor ( $p \leq 0,10$ ) en la zona central (CEN), con proporciones superiores al 90% (Figura 4B). Finalmente, la fracción arena presentó valores máximos en cercanías a las desembocaduras, con contenidos superiores al 19% en SA-LC y al 17% en CQ-LM y muy bajos, inferiores al 6%, hacia las zonas profundas del embalse (Figura 4C). Sin embargo, se destaca un contenido significativamente mayor de arena, de 6% ( $p \leq 0,10$ ), en la garganta con respecto al centro, donde el mismo es inferior al 1%.

El análisis en detalle de la clase textural dominante, limo, muestra que la subclase limo muy fino se encontró en proporciones menores al 10% en las zonas cercanas al ingreso de los tributarios, con un aumento hacia el centro y la garganta donde alcanzó los mayores contenidos ( $p \leq 0,10$ ), superiores al 20% (Figura 5A). El limo fino, corresponde a la fracción que se halló en mayor proporción en todas las muestras del ESR, siendo el centro aquella que presentó las concentraciones más elevadas, próximas al 50% ( $p \leq 0,10$ ). Las muestras obtenidas de la garganta del embalse presentaron además contenidos altos, por encima del 40%, mientras que las menores acumulaciones, por debajo del 30%, se hallaron en las zonas próximas a las desembocaduras (Figura 5B). A diferencia de las anteriores, la fracción limo medio se presentó predominantemente en las zonas próximas a las desembocaduras ( $p \leq 0,10$ ), por encima del 28% en SA-LC y del 26% en CQ-LM. Por otro lado, en las zonas centro y garganta las proporciones resultaron inferiores al 20% (Figura 5C). Del mismo modo, es posible de observar esta distribución para la fracción limo grueso, donde las concentraciones más elevadas, en torno al 16%, se presentaron en las zonas próximas a las desembocaduras y concentraciones bajas, menores a 4% en las zonas del centro y garganta ( $p < 0,10$ ; Figura 5D).

Santa y Herrero (1979) y Borgnino *et al.*, (2006) realizaron una caracterización espacial de la composición granulométrica de los sedimentos superficiales del ESR y a pesar de que las técnicas de muestreo, análisis y representación de resultados fueron otras a las empleadas en el presente trabajo, los resultados en cuanto a las distribuciones generales de los tamaños de partícula obtenidos coincidieron en gran medida.

La distribución de los diversos tamaños de partículas en los sitios muestreados en el ESR, se encuentran condicionados por la dinámica del transporte sedimentario fluvial. La pérdida de competencia de los ríos al ingresar al embalse resulta en la depositación de sedimentos gruesos en las zonas cercanas a las desembocaduras. Por otro lado, las partículas finas generalmente transportadas en suspensión pueden alcanzar zonas más alejadas. A pesar de que existen diferencias litológicas en las cuencas de aporte (Ugarte, 2006) el análisis de la granulometría de los sitios SA-LC y CQ-LM próximos a las desembocaduras no reflejó diferencias significativas entre los contenidos de clases texturales de ambos sitios que permita evidenciar la distinta naturaleza de los sedimentos. Esto podría ser consecuencia de que las muestras de sedimentos se tomaron aguas adentro en el embalse, alejados del área de aporte por parte de los ríos. Finalmente, el mayor contenido de gruesos en el sitio de la zona garganta con respecto a la zona centro, se asociaría a un aporte alóctono secundario por procesos erosivos y de deslizamientos en las laderas cercanas al sitio. Uno de los factores intervinientes en los procesos de erosión de las laderas y desplazamiento de material a la zona de la garganta podría ser la construcción de la obra Autovía de Punilla, realizada durante el período 2017-2018 cercana al sitio de muestreo mencionado, lo que podría ser un condicionante de la granulometría de dicha área del embalse.

#### **Nutrientes**

En cuanto a la distribución espacial de las concentraciones de P y N en el sedimento, se muestran comportamientos diversos entre las distintas fracciones: las concentraciones de PT y PI se distribuyeron de manera similar, presentando los valores más bajos, cercanos a los  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , en las zonas próximas a las desembocaduras con un aumento gradual hacia la zona de la garganta, donde los contenidos de PT de  $1536 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  y los de PI de  $1456 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  resultan significativamente mayores ( $p \leq 0,10$ ; Figura 6A y 6B). Esta distribución coincide con los resultados obtenidos por Ruiz *et al.*, (2005) donde se manifiesta una mayor concentración de PI y PT en el sedimento de las zonas profundas del embalse. En concordancia con nuestros resultados, Granero *et al.*, (2004) y Borgnino *et al.*, (2006) encontraron las concentraciones más altas de PT en la zona de la garganta.

Con respecto al PO, las concentraciones resultaron menores a  $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  en cercanías a las desembocaduras y garganta y las máximas, de  $307 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , fueron halladas en el centro del embalse ( $p \leq 0,10$ ; Figura 6C). Finalmente, los contenidos de NIT resultaron de  $270 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  en el sitio SA-LC y exhibieron un aumento hacia el sitio CQ-LM a valores de  $811 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  ( $p \leq 0,10$ ) y, en menor proporción, hacia la zona profunda de la garganta a contenidos de  $702 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (Figura 6D).

El contenido de COT en el sedimento, si bien se distribuyó casi de manera homogénea en el ESR, mostró un aumento desde las zonas próximas a las desembocaduras, 5,5 % en CQ-LM y 4,9 % en SA-LC, a concentraciones de 6,7 % en la zona de la garganta ( $p \leq 0,10$ ; Figura 6E). Por su parte, el contenido de CIT resultó mayor, en torno al 2 %, en la región central ( $p \leq 0,10$ ), mientras que en el resto de los sitios presentó valores por debajo, 1-2 % (Figura 6F). La distribución espacial de las concentraciones de los metales FeT y MnT presentó



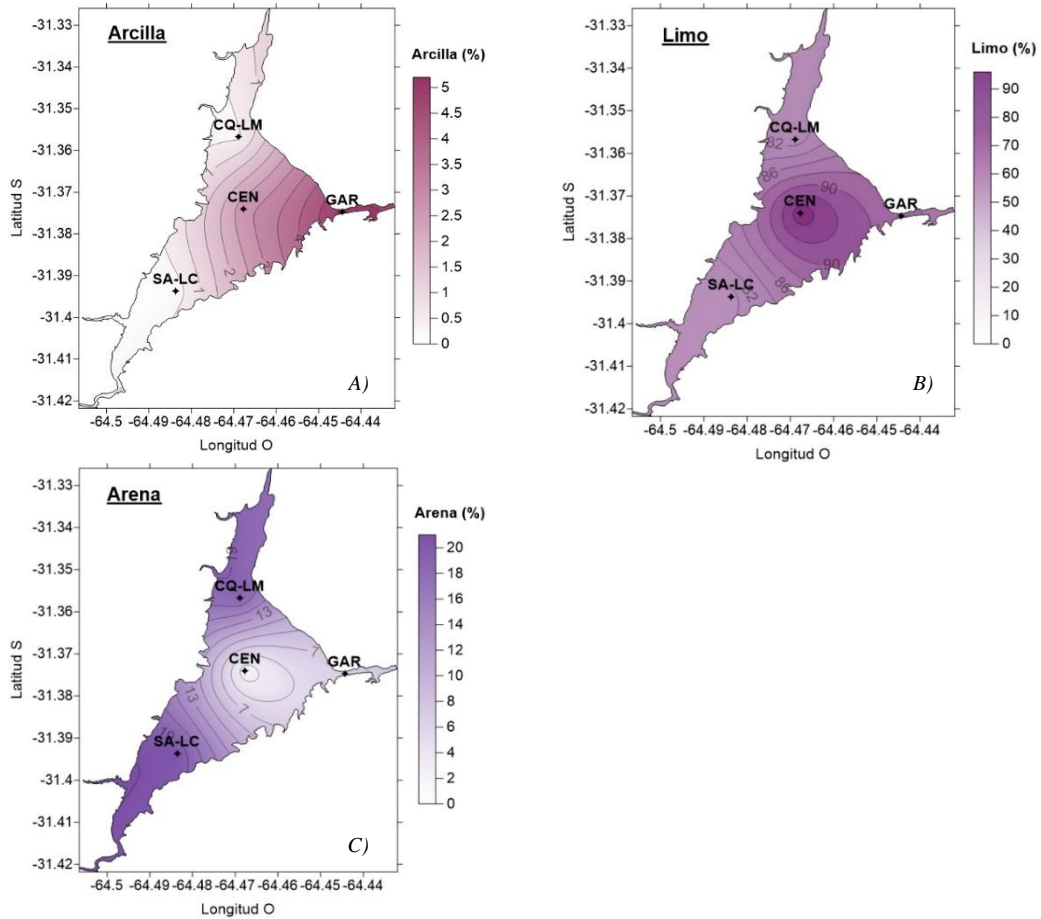


Fig. 4: Mapas de contorno de la distribución espacial del contenido de la fracción A) arcilla, B) limo y C) arena.

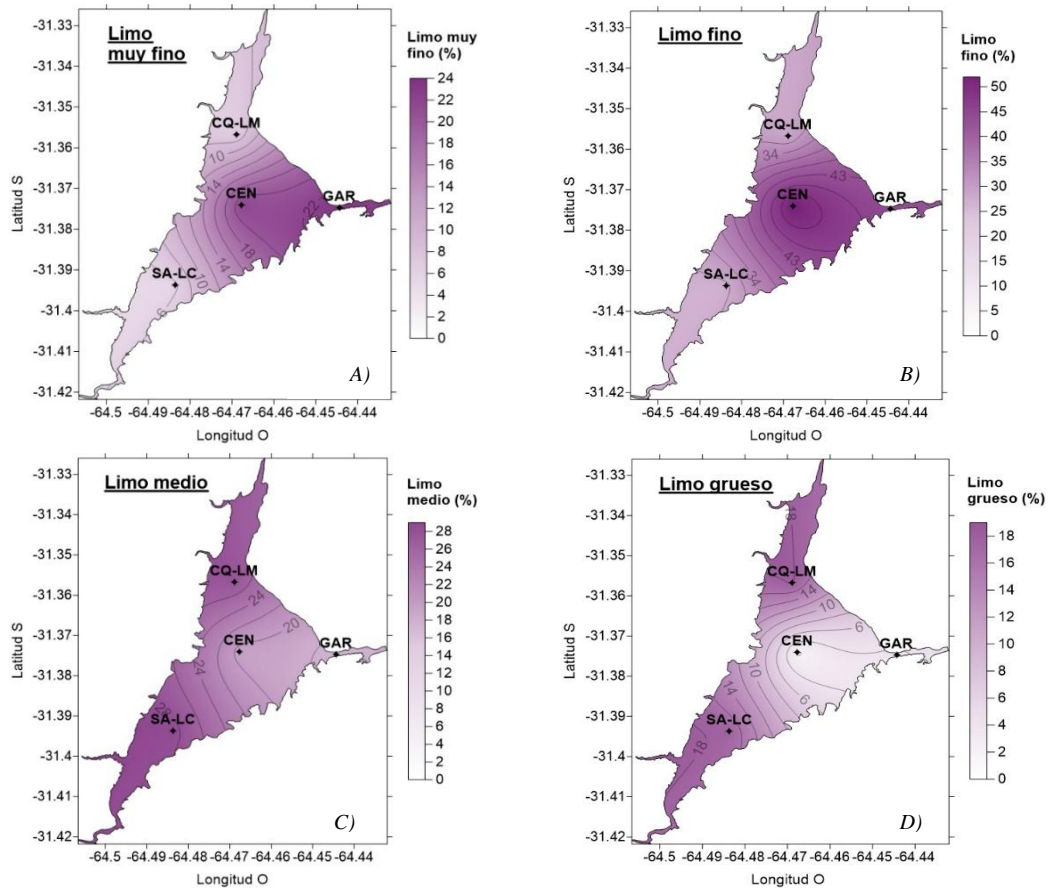
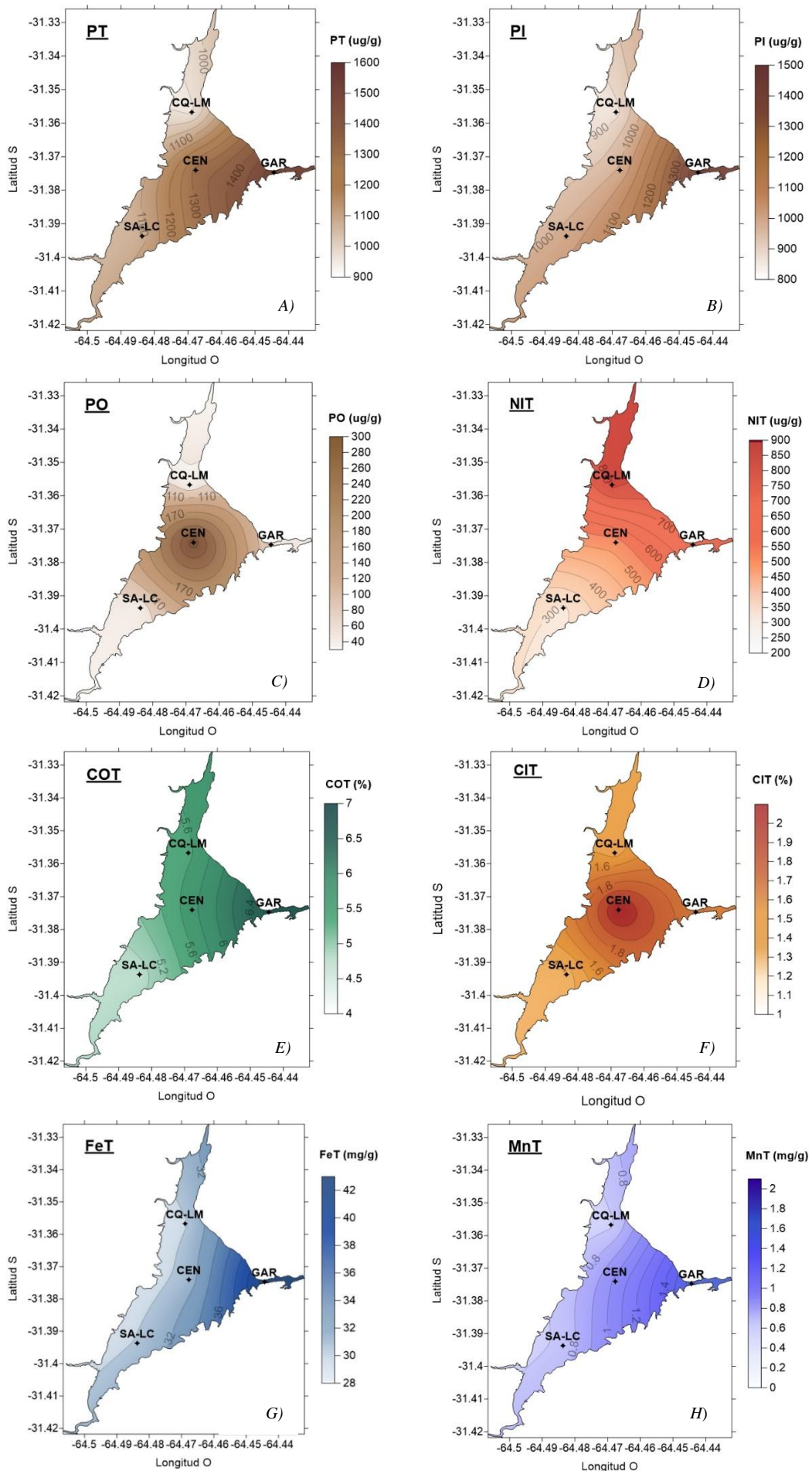


Fig. 5. Mapas de contorno de la distribución espacial del contenido de la fracción A) limo muy fino, B) limo fino, C) limo medio y D) limo grueso.



**Fig. 6:** Mapas de contorno de la distribución espacial de las concentraciones medias de A) PT, B) PI, C) PO, D) NIT, E) COT, F) CIT, G) FeT y H) MnT en los sedimentos superficiales del ESR.

comportamientos similares a los descritos para PT, PI, y COT, donde se observó un aumento en las concentraciones de los mismos hacia la garganta del embalse. En este punto se observaron las concentraciones mayores FeT y MnT, 42,8 y 1,7 mg.g<sup>-1</sup> respectivamente ( $p \leq 0,10$ ). Asimismo, se observó que la distribución de FeT y MnT coincide con la distribución de las fracciones de tamaño limo muy fino y arcilla en los sedimentos del embalse (Figura 6G y 6H).

### **Distribución temporal de las concentraciones de PT**

Debido a su importancia en el proceso de la eutrofización, el contenido de PT en sedimentos ha sido estudiado por diversos autores. Si bien las técnicas de muestreo, los sitios muestreados y análisis químicos para la determinación de las concentraciones no son análogas entre los estudios, se puede identificar una tendencia de aumento general en el tiempo. Las concentraciones de PT en sedimentos superficiales del centro del embalse fueron de 911  $\mu\text{g.g}^{-1}$  durante el año 2000 (Borgnino *et al.*, 2006), 1076  $\mu\text{g.g}^{-1}$  como valor medio obtenido de muestreos durante el año comprendido entre 1999 y 2000 (Granero *et al.*, 2004), 1003  $\mu\text{g.g}^{-1}$  como valor medio obtenido de muestreos entre los años 1999 y 2004 (Ruiz *et al.*, 2005), 1114  $\mu\text{g.g}^{-1}$  obtenido en el 2015 (Degano *et al.*, 2016) y 1316  $\mu\text{g.g}^{-1}$  obtenido en el presente estudio a partir del muestreo realizado el día 26/06/2018. En la garganta las concentraciones halladas fueron de 970  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (Borgnino *et al.*, 2006), 1342  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (Granero *et al.*, 2004), 1069 (Ruiz *et al.*, 2005) y 1536  $\mu\text{g.g}^{-1}$  obtenidas en este estudio durante el año 2018. En los sitios cercanos a las desembocaduras se obtuvieron en SA-LC contenidos de 865  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (Borgnino *et al.*, 2006), 901  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (Ruiz *et al.*, 2005) y 1082  $\mu\text{g.g}^{-1}$  en este estudio; por otro lado, en CQ-LM resultaron de 670  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (Borgnino *et al.*, 2006), 497  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (Ruiz *et al.*, 2005) y mientras que nuestros resultados alcanzan 951  $\mu\text{g.g}^{-1}$ . A partir de estos resultados es esperable que esta tendencia continúe en el tiempo.

### **Asociación entre variables físicas y químicas en sedimentos**

Se realizaron análisis de correlación para determinar si existe una asociación entre las variables físicas y químicas analizadas en el sedimento. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1 y 2 del Anexo 1.

Se encontró una correlación positiva de la fracción inorgánica del P con el Fe en el sitio CEN ( $p \leq 0,01$ ) y con el Mn en casi la totalidad de los sitios: CQ-LM, SA-LC y CEN. Borgnino *et al.*, (2006) obtuvieron, al analizar la mineralogía de sedimentos extraídos del ESR, que el fosfato unido al calcio y al hierro correspondían a los principales compuestos de P en los sedimentos. Asimismo, observaron que los primeros compuestos eran predominantes en las zonas de las desembocaduras, y los segundos en las zonas profundas del centro y presa. A su vez, Borgnino *et al.*, (2006) encontraron una asociación entre el fosfato y las partículas de arcillas, especialmente aquellas recubiertas con patinas de oxi-hidróxidos de Fe. Lo anterior permite interpretar que parte del P encontrado, predominantemente en las zonas profundas del embalse, estaría vinculado con los mayores contenidos de Fe y fracciones granulométricas finas presentes en estas zonas

(Wetzel, 1981; López, 2009; Borgnino *et al.*, 2006;). Asimismo, se encontró una correlación positiva entre PT y NIT y las fracciones finas de limo y arcilla ( $p \leq 0,01$ ).

Por otra parte, y a diferencia de Borgnino *et al.*, (2006), en nuestro estudio no se encontraron correlaciones positivas significativas del CIT con las fracciones químicas del P. Sin embargo, el CIT se correlacionó positivamente con el Fe en el sitio GAR ( $p \leq 0,01$ ). Si bien las concentraciones de CIT encontradas resultaron bajas, estas se concentraron en la región central del embalse, donde fueron encontradas a su vez los contenidos más altos de PO. Es posible relacionar esta distribución con procesos biogeoquímicos, donde el desarrollo de floraciones algales puede ocasionar la precipitación de carbonatos debido al consumo de CO<sub>2</sub> en procesos fotosintéticos generando un desequilibrio en el sistema de los carbonatos y produciendo su precipitación, tal como lo propone Degano *et al.*, (2016). Asimismo, variaciones en el pH podrían generar episodios de precipitación de carbonatos.

Por otro lado, en la mayoría de los sitios se encontró una correlación positiva del COT con el Mn y con las fracciones químicas del P ( $p \leq 0,01$ ). Gaiero *et al.*, (1997) y Monferrán, (2015) interpretaron a partir de estudios de sedimentos en tributarios al ESR que la materia orgánica juega un rol importante como factor de control en la concentración de metales en el sedimento y encontraron que las concentraciones de metales, como el Fe y el Mn, presentaban una correlación positiva con la materia orgánica, formando probablemente ligandos con la misma. En concordancia, los resultados de este trabajo indicarían que el Fe y Mn se encuentran asociados en el depósito sedimentario.

### **CONCLUSIONES**

El estudio de los sedimentos superficiales del ESR, permitió establecer un modelo conceptual del funcionamiento del ESR (Fig. 7), para lo cual fueron considerados los siguientes factores como control principal de su composición geoquímica y sedimentaria:

1. Aporte alóctono químico y sedimentario primario: los mayores contenidos de NIT encontrados en las zonas próximas a las desembocaduras demostraría un aporte antrópico de compuestos nitrogenados desde cercanías a dicho sector. A su vez, el aporte sedimentario fluvial ocasiona que la carga sedimentaria gruesa (fracciones gruesas de limo y arena) sea depositada en las zonas próximas a las desembocaduras a causa de la desaceleración que provocaría el ingreso de los ríos al embalse.

2 y 3. Transporte en suspensión de gran parte de la carga sedimentaria fina (fracciones finas de limo y arcilla): permite que los materiales clásticos finos alcancen sectores más alejados a las zonas de aporte donde sedimentan.

4 y 5. Aporte autóctono biogénico de materia orgánica y de precipitación química y/o bioinducida de carbonatos: lo que se confirma por la presencia de las mayores concentraciones de PO y CIT en la zona profunda centro.

6. Aporte alóctono sedimentario secundario: encontrado en la zona profunda garganta por cercanía del sector con las laderas de alta pendiente. Produce el aporte de una mayor proporción de fracciones granulométricas gruesas (arena)

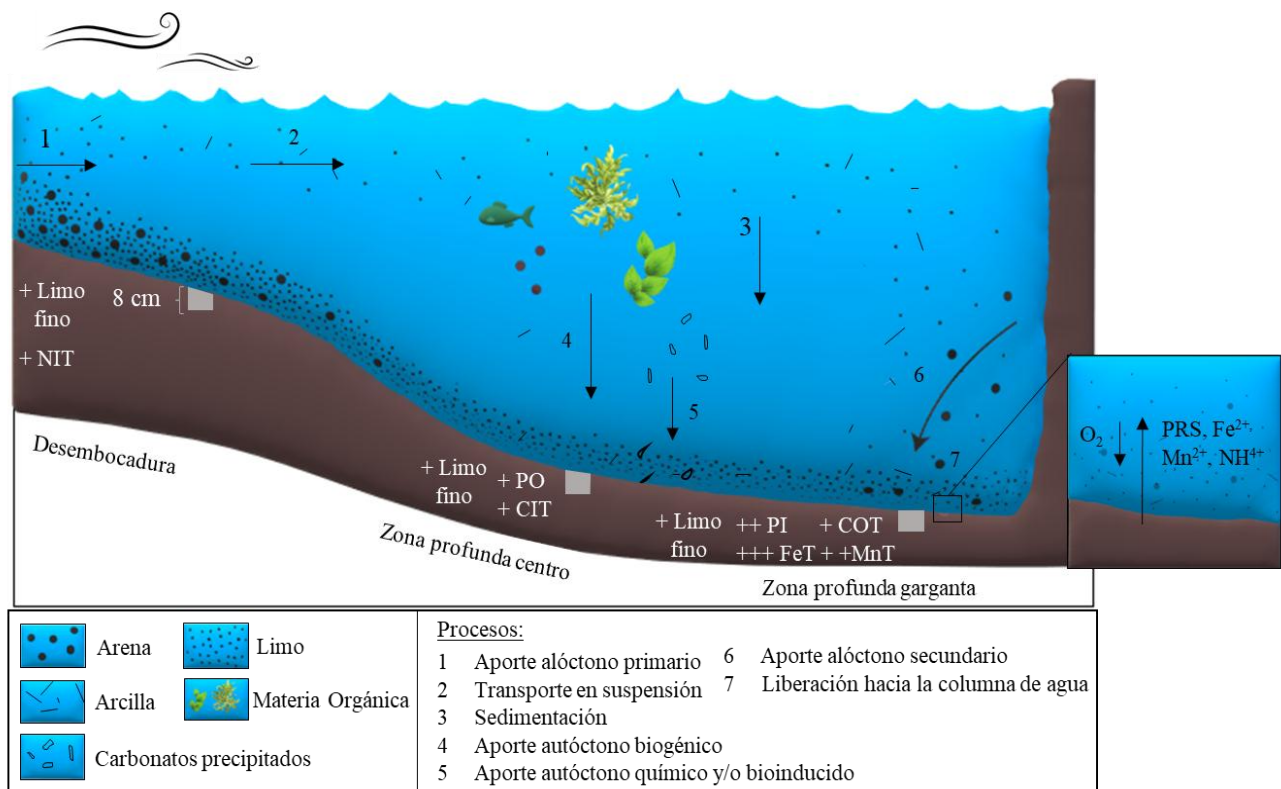
en dicho sector, con respecto al sitio de la zona profunda centro.

7. La presencia de Mn, Fe y de materia orgánica en el sistema lacustre cumplen un rol importante en la acumulación del P en el sedimento por procesos de coprecipitación, adsorción y formación de complejos. Las mayores concentraciones de PI, FeT, MnT, COT, así como altas concentraciones de NIT, fueron encontradas en la zona profunda del embalse, donde predominan las fracciones granulométricas finas. Se ha puesto en evidencia que el sedimento constituye un reservorio de altas concentraciones de P, FeT, MnT y NIT, lo cual posibilitaría que, ante la presencia de condiciones particulares, como anoxia, en la columna de agua, ocurra la liberación de PRS, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, contribuyendo de esta manera al proceso de eutrofización en el ESR.

**AGRADECIMIENTOS**

Las actividades asociadas a la realización del presente trabajo fueron realizadas en calidad de becaria INA, el marco de la Actividad Permanente de INA-CIRSA: “Monitoreo del Embalse San Roque y Gestión de Información de Calidad de Aguas y Cianobacterias”, siendo cofinanciadas por los proyectos: PRIMAR-TP 2018, Proyecto Consolidar 2018-2021 (SECyT-UNC). PICT-2014-3298, PICT-2013-1371 y FITS 2013, Medio Ambiente – FONARSEC Resol. 572/14.

Se agradece a Natalia Crema y Roxana Córpora por el apoyo en el trabajo de campo y la realización de las determinaciones químicas en los laboratorios de Aguas Cordobesas y a Luciana Mengo por su asesoramiento en el procesamiento de muestras para granulometría.



**Fig. 7:** Modelo conceptual del funcionamiento del embalse San Roque (ver explicación en el texto).



## REFERENCIAS

- [1] Aguilera, A., Haakonsson, S., Martin, M. V., Salerno, G. L., y Echenique, R. O. (2018). Bloom-forming cyanobacteria and cyanotoxins in Argentina: A growing health and environmental concern. *Limnologia*, 69, 103-114.
- [2] Alarcos Llorach E. (1999). *Gramática de la Lengua Española*, Madrid, Editorial Espasa Calpe.
- [3] Argañaraz, J. P., Pizarro, G. G., Zak, M., y Bellis, L. M. (2015). Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina. *Fire Ecology*, 11(1), 55-73.
- [4] Blott, S. J. (2010). GRADISTAT ver. 8.0: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments by sieving or laser granulometer. Kenneth Pye Associates Ltd, UK (www.kpal.co.uk/gradistat.html).
- [5] Borgnino, L., Avena, M. y De Pauli, C. (2006). Surface properties of sediments from two Argentinean reservoirs and the rate of phosphate release. *Water Research*, 40(14): 2659-2666.
- [6] Córpora, R., Crema, N., Bonfati, E., Busso, F., Murad, E., Halac, S., Rodríguez, M. I., Ruiz, M. y Ravera, M. (2018). Determinaciones analíticas en sedimentos del Embalse San Roque: nutrientes y metales. VII Congreso Internacional Sobre Tratamiento Integral del Agua. Córdoba, Argentina.
- [7] Chorus I, Bartram J. (1999). Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public health, consequences, monitoring and management. E&FN Spon (on behalf of WHO), London, pp. 1-416.
- [8] Crutzen, P. J. (2016). Geology of Mankind en Crutzen, P. J., y Brauch, H. G. (Eds.) Paul J. Crutzen: a pioneer on atmospheric chemistry and climate change in the Anthropocene (Vol. 50, pp. 211-215). Springer.
- [9] Davidson, T. A. y Jeppesen E. (2012). The role of paleolimnology in assessing eutrophication and its impact on lakes. *Journal of Paleolimnology*, 49(3), 391-410.
- [10] Dean, W. E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Research*, 44(1), 242-248.
- [11] Degano, M. F., Rodríguez, M. I., Ruiz, M., Halac, S., y Ruibal, A. L. (2016). Estudio preliminar paleolimnológico del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina). 3º Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Buenos Aires.
- [12] Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. (2012). InfoStat, version 2012, InfoStat Group, FCA - UNC, Argentina.
- [13] Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo Buendía, M. y Valladares, F. (2006). Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.
- [14] Franco, D. P. M., Manzano, J. Q. y Cuevas, A. L. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Revista ContactoS*, 78, 25-33.
- [15] Gaiero, D. M., Ross, G. R., Depetris, P. J., y Kempe, S. (1997). Spatial and temporal variability of total non-residual heavy metals content in stream sediments from the Suquia River system, Cordoba, Argentina. *Water, air, and soil pollution*, 93(1-4), 303-319.
- [16] Gordillo, C. E., y Lencinas, A. N. (1979). Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. In Segundo Simposio de Geología Regional Argentina (Vol. 1, pp. 577-650). Academia Nacional de Ciencias Córdoba.
- [17] Granero, M., Bustamante, A., López, F., Ruiz, M., 2004. Hipolimnion water quality and its relationship to internal P loading in an eutrophicated water body: san Roque Reservoir (Córdoba, Argentina). *J. Hydraul. Res.* 42, 310-315
- [18] Halac, S., Mengo, L., Guerra, L., Lami, A., Musazzi, S., Loizeau, J. L., Ariztegui, D. y Piovano, E. L. (2020). Paleolimnological reconstruction of the centennial eutrophication processes in a sub-tropical South American reservoir. *Journal of South American Earth Sciences*, 103, 102707.
- [19] 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. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101-110.
- [20] López, M. P. (2009). Los sedimentos y su incidencia en la eutrofización de los embalses. Caso del Río Lozoya. *Ingeniería del agua*, 16(4), 273-283.
- [21] Martino R. y Guerreschi A. B. (2014). La Estructura Neoproterozoica-Paleozoica inferior del Complejo Metamórfico de las Sierras Pampeanas de Córdoba. *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino*, Córdoba (pp. 95-129).
- [22] Nadal, F., Ruiz, M., Rodríguez, M. I., Halac, S. y Olivera, P. (2012). Evaluación de la calidad de agua para uso recreativo del embalse San Roque, Córdoba, Argentina. I Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos Instituto Nacional del Agua (INA). Ezeiza, Buenos Aires.
- [23] Monferrán, M. V. (2015). Metals and metalloids in water and sediment of the Suquia River basin: spatial and temporal changes. *En The Suquia River Basin (Córdoba, Argentina)* (pp. 113-143). Springer, Cham.
- [24] O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., y Gobler, C. J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful algae*, 14, 313-334.
- [25] Pasquini, A. I., Lecomte, K. L., Piovano, E. L. y Depetris, P. J. (2006). Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International*, 158(1): 127-139.
- [26] Rodríguez, M. I. y Ruiz, M. (2016). Limnology of the San Roque Reservoir. *En The Suquia River Basin (Córdoba, Argentina)*. (pp. 37-59) Springer, Cham.
- [27] Rodríguez, M. I., Ruiz, M., Vilchez, G., Crema, N., Ruibal Conti, A. L., Bustamante, M. A. 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
- [28] Rossen, A., Rodríguez, M. I., Ruibal Conti, A. L., Fortunato, M. S., Bustamante, M. A., Ruiz, M., Meleró, V., Angelaccio, C. y Korol, S. (2007). Evaluación del estado sanitario del lago San Roque (Córdoba) empleando indicadores microbiológicos. XXIº Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina.
- [29] Ruibal Conti A. L.; Bustamante, A. López F.; Buscaglia, G.; Berra, C.; Granero, M.; Arnica, D.L. y Pirard, C. (1999). Monitoreo y modelación de la hidrodinámica y calidad del recurso hídrico afectado por una represa: Lago San Roque (Córdoba). *Anales del Congreso Argentino de Grandes Represas y Aprovechamiento Hidroeléctricos*. San Martín de los Andes, Argentina. (pp. 483-492).
- [30] Ruiz, M., Granero, M., Rodríguez, M. I., Bustamante, M. A., y Ruibal Conti, A. L. (2005). Importancia de los sedimentos como fuente interna de fósforo en el Embalse San Roque (Córdoba): Determinación de una metodología para su estudio. XX Congreso Nacional del agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, Argentina (pp. 9-14).
- [31] Salgado, Claudio E. (2015). Plantaciones mixtas para el enriquecimiento de la cubierta vegetal en la Cuenca del Arroyo Las Mojaras. Área de Consolidación Planificación y manejo de cuencas hidrográficas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNC.
- [32] Santa, J.A. y Herrero Machado, M.A. (1979). "Estudio sedimentológico del Lago San Roque: Anales del IX Congreso Nacional del Agua. San Luis (pp. 339-350).
- [33] Ugarte, Rodrigo M. (2006). Mitigación de la Amenaza por Inundaciones Repentinas en las Comunas del Sur de Punilla. Evaluación geomorfológica de la amenaza por crecientes repentinas en la comuna de San Antonio de Arredondo, Provincia de Córdoba. Centro de Investigación de la Región Semiárida (CIRSA) – Instituto Nacional del Agua (INA) - Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. UNC. Marzo de 2006.
- [34] Vaasma, T. (2008). Grain-size analysis of lacustrine sediments: a comparison of pre-treatment methods. *Estonian Journal of Ecology*, 57(4).
- [35] Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.
- [36] Wetzel, R. G. (1981). *Limnología* (No. 504.45 WET).

## ANEXO 1

### Asociación entre las variables físico-químicas.

**TABLA 1:** COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ANALIZADAS PARA LOS SITIOS GAR Y CEN.

	PT	PI	PO	NIT	Fe	Mn	COT	CIT	Arcilla	Limo	Arena	
PT		0,71	0,53	0,53	-0,79	-0,46	<b>-0,86</b>	<b>-0,86</b>	0,12	0,14	-0,48	GAR
PI	0,50		-0,21	0,06	-0,26	-0,17	-0,67	-0,31	-0,26	0,38	-0,42	
PO	0,14	-0,79		0,66	<b>-0,79</b>	-0,43	-0,40	<b>-0,83</b>	0,49	-0,27	-0,19	
NIT	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>		-0,55	-0,68	-0,60	-0,57	<b>0,87</b>	-0,74	0,22	
Fe	0,52	<b>0,98</b>	-0,75	<i>n.d.</i>		0,43	0,62	<b>0,89</b>	-0,18	0,02	0,22	
Mn	0,64	<b>0,97</b>	-0,66	<i>n.d.</i>	<b>0,93</b>		0,28	0,46	-0,59	0,36	0,15	
COT	<b>0,89</b>	0,58	-0,03	<i>n.d.</i>	0,64	0,63		0,75	-0,36	0,13	0,29	
CIT	-0,12	-0,36	0,33	<i>n.d.</i>	-0,48	-0,25	-0,28		-0,29	-0,04	0,54	
Arcilla	0,00	0,05	-0,06	<i>n.d.</i>	-0,05	0,07	0,14	0,53		<b>-0,90</b>	0,35	
Limo	-0,44	0,21	-0,56	<i>n.d.</i>	0,18	0,12	-0,39	-0,17	-0,16		-0,73	
Arena	0,40	-0,22	0,54	<i>n.d.</i>	-0,13	-0,15	0,26	-0,18	-0,47	-0,79		
CEN												

**TABLA 2:** COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ANALIZADAS PARA LOS SITIOS SA-LC Y CQ-LM.

	PT	PI	PO	NIT	Fe	Mn	COT	CIT	Arcilla	Limo	Arena	
PT		0,69	0,27	-0,36	0,52	<b>0,83</b>	0,78	0,19	-0,36	0,02	-0,01	SA-LC
PI	<b>0,98</b>		-0,52	-0,48	0,58	<b>0,92</b>	<b>0,83</b>	0,62	-0,12	-0,19	0,19	
PO	<b>0,88</b>	0,77		0,22	-0,15	-0,24	-0,18	-0,59	-0,27	0,27	-0,27	
NIT	-0,74	-0,72	-0,67		-0,59	-0,63	-0,25	-0,16	-0,57	-0,35	0,36	
Fe	0,39	0,40	0,30	-0,72		0,66	0,66	-0,12	0,11	0,59	-0,59	
Mn	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>	0,72	<b>-0,85</b>	0,64		<b>0,83</b>	0,52	0,00	0,06	-0,06	
COT	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,89</b>	-0,73	0,56	<b>0,90</b>		0,49	-0,47	0,03	-0,01	
CIT	0,63	0,60	0,61	-0,16	-0,31	0,29	0,48		0,06	-0,44	0,44	
Arcilla	0,66	0,60	0,70	-0,32	0,35	0,65	<b>0,80</b>	0,19		0,30	-0,32	
Limo	<b>0,96</b>	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	-0,72	0,49	<b>0,90</b>	<b>0,99</b>	0,54	0,78		<b>-1,00</b>	
Arena	<b>-0,95</b>	<b>-0,91</b>	<b>-0,91</b>	0,71	-0,48	<b>-0,89</b>	<b>-1,00</b>	-0,53	-0,81	<b>-1,00</b>		
CQ-LM												