

Análisis de la distribución temporal de la concentración de Clorofila-a en el embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina

Micaela Ledesma^{1,2,3,*}, Claudia Rodríguez¹, Claudia Rosa Ledesma^{1,2}, Matías Bonancea^{1,3}, Lucio Pinotti^{3,4}, Carlos Marcelo Scavuzzo⁵, Alba Germán⁵, Anabella Ferral^{3,5}

1- Departamento de Estudios Básicos y Agropecuarios, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

2- Instituto Académico Pedagógico de Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Nacional de Villa María, Córdoba, Argentina.

3- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

4- Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

5- Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, Centro Espacial Teófilo Tabanera, Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), Argentina.

Palabras clave

Series de Tiempo

Modelos estadísticos

Sensores Remotos

Recursos Hídricos

Resumen. En los últimos años, la contaminación y la eutrofización de los recursos hídricos se ha convertido en uno de los problemas ambientales más importantes de mundo, ya que pone en riesgo tanto la cantidad como la calidad del agua para consumo humano. La concentración de Clorofila-a (Cl-a) es un buen indicador de la calidad del agua. El objetivo de este trabajo fue generar una serie de tiempo a partir de un modelo estadístico basado en datos de campo e información satelital de MODIS, para determinar y predecir la distribución temporal de la Cl-a en el embalse Río Tercero. Se obtuvo un modelo de regresión lineal ($R^2=0,66$), el cual tiene en cuenta la relación entre bandas 1 y 2 del satélite MODIS. Con dicho algoritmo, se obtuvo un valor de Cl-a para cada día desde Enero de 2009 a Septiembre de 2019. Se generó una serie de tiempo para el reservorio bajo estudio. Este trabajo es una contribución relevante para estudiar la evolución temporal de la contaminación del agua en reservorios.

Citar como: Ledesma, M., Rodríguez, C., Ledesma, C., Bonancea, M., Pinotti, L., Scavuzzo, C., Germán A. y Ferral, A. (2020). Análisis de la distribución temporal de la concentración de Clorofila-a en el embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina. *Revista Científica FAV-UNRC Ab Intus* 5(3) 83-87

Recibido: 07/5/2020 Aceptado: 08/6/2020

***Autora para correspondencia:** Micaela Ledesma. E-mail: mledesma@ayv.unrc.edu.ar. Ruta Nacional 36 Km 601, 5800 Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Tel: +54 358 46 76145.

Financiamiento:

PPI 2016-2018: Aplicación de técnicas de teledetección para la evaluación de la calidad del agua y riesgos potenciales para la salud en un sistema de embalses encadenados de Córdoba. SECyT, UNRC. Tipo de participación: Integrante de equipo (Directora: Dra. Claudia Rodríguez).

PICT 0910/13. Transferencia de masa a través de la corteza: magmatismo, deformación y metalogénesis. Tipo de participación: Integrante de equipo (Director: Dr. Lucio Pinotti).

Recursos propios por prestación de servicios a terceros. Se realizará la presentación a proyectos y programas en futuras convocatorias a nivel provincial y nacional para aumentar la disponibilidad de fondos.

Analysis of the temporal distribution of the Chlorophyll-a concentration in the Río Tercero reservoir, Córdoba, Argentina.

Keywords

Time Series
Statistical models
Remote Sensing
Water resources

Abstract. In recent years, pollution and eutrophication of water resources has become one of the most important environmental problems worldwide because it puts at risk the quantity and quality of drinking water. The concentration of chlorophyll-a (Chl-a) is a good indicator of water quality. The aim of this work was to develop time series from a statistical model based on field data and satellite information from MODIS to determine and predict the temporal distribution of Chl-a in the Río Tercero reservoir. A regression model of simple linear regression was obtained ($R^2=0.66$), which takes into account the relationship between bands 1 and 2 of the MODIS satellite. With this algorithm, a value of Chl-a was obtained for each day from January 2009 to September 2019. A time series was generated. This study is a relevant contribution to the study of the evolution of water pollution in surface water resources.

Lagos y embalses proveen múltiples servicios ecosistémicos a la sociedad, como generación de energía, provisión de agua para consumo humano, animal y riego, atenuación de crecientes, recarga de napas subterráneas y provisión de hábitat para especies animales y vegetales (Ledesma *et al.*, 2019). Desafortunadamente, las actividades antrópicas humanas amenazan los recursos hídricos, afectando su biodiversidad y estado, resultando en una disminución del valor económico (Khan y Zhao, 2019).

La eutrofización es uno de los problemas más serios de los reservorios de agua dulce, caracterizada por la producción desmedida de fitoplancton causada por el exceso de nutrientes como Fósforo y Nitrógeno (Prosperi, 2005).

Los sensores remotos permiten detectar pigmentos del fitoplancton, como la concentración de Clorofila-a (Cl-a) en agua, el cual es un buen indicador de la biomasa del fitoplancton. Esta técnica permite mayor cantidad de monitoreos con mínimos costos (Bonansea *et al.*, 2015).

El sensor MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Terra y Aqua lanzados en 1999 y 2002, respectivamente, proporciona una cobertura global diaria con una resolución espacial que varía de 250 m a 1 km. Este sensor muestra un gran potencial para el monitoreo de la calidad del agua, tanto oceánicas como conti-

mentales. Las imágenes son de descarga gratuita y de libre acceso (German *et al.*, 2017).

Diferentes autores han generado modelos estadísticos a partir de datos satelitales y muestras de campo para determinar la distribución espacial de Cl-a en el embalse Río Tercero (Bonansea *et al.*, 2015; Ledesma *et al.*, 2019), pero no se registran antecedentes que determinen su distribución temporal.

Las series de tiempo permiten analizar el comportamiento del sistema bajo estudio y predecir su futuro (Li *et al.*, 2019). Además, posibilita extraer información estadística y otras características como la frecuencia de eventos extremos en caso de que sucedan (German *et al.*, 2017).

El objetivo de este trabajo fue generar una serie de tiempo a partir de un modelo estadístico basado en datos de campo e información satelital de MODIS para determinar el comportamiento temporal de la Cl-a en el embalse Río Tercero.

El embalse Río Tercero, localizado en la provincia de Córdoba, Argentina, es considerado uno de los reservorios más grandes de la región central del país. Cumple con múltiples propósitos, como provisión de agua para humanos y animales, generación de energía y control de crecientes (Rodríguez *et al.*, 2007). Se realizaron muestreos mensuales entre 2009 y 2019, en un punto central del reservorio (Figura 1). Este punto seleccionado representa la calidad del

agua del embalse en conjunto y no está influenciada por la entrada de los afluentes. El muestreo, almacenamiento, conservación, transporte y técnicas analíticas fueron llevadas a cabo de acuerdo a métodos estandarizados (APHA, 2000).

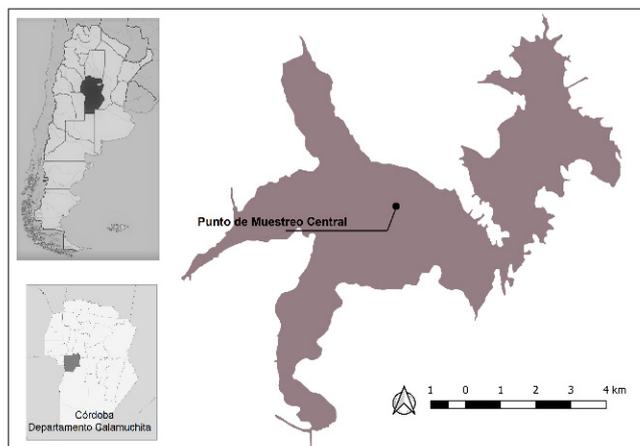


Figura 1. Punto de muestreo del embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina

Los datos del satélite MODIS fueron descargados de la aplicación AppEEARS (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples) (Neeley, 2018). Se utilizaron los productos MOD09GQ y MOD09GA en conjunto. El primero provee información de la reflectancia diaria a nivel de superficie de la banda 1 (620-670 nm) y 2 (841-876 nm). El segundo brinda información de la calidad de los datos y geometría de visión del satélite (German et al., 2017). Con ambos datos, de campo y satelitales, se construyó un modelo estadístico a partir de una regresión lineal simple (Bonansea et al., 2015; Germán et al., 2017; Ledesma et al., 2019). Con el software R versión 3.5.3, los valores de reflectancia de cada banda y sus relaciones fueron tabulados para cada fecha de muestreo en coincidencia con los valores de Cl-a. Con la ayuda del producto MOD09GA los días con presencia de nubes fueron descartados. Con los coeficientes de correlación de Pearson se determinaron aquellas bandas o relaciones que se encuentran más relacionadas a la Cl-a. Con esos resultados, se generó un modelo de regresión lineal simple definido como:

$$(1) \quad y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

donde y_i , es la variable respuesta LnCl-a, β son los coeficientes de regresión, x_i es la variable expli-

cativa, o sea las bandas de MODIS o sus relaciones y ε_i es el error aleatorio (Ledesma et al., 2019). El 70% de los datos fueron utilizados para la obtención del modelo y el 30% restante para su validación (Li et al., 2017).

Finalmente, se generó una serie de tiempo para el período bajo estudio. Para una mejor observación de los resultados, se graficaron los promedios mensuales de cada año (Ferral et al., 2017).

La tabla 1 muestra valores descriptivos de la variable Cl-a, de acuerdo a la estación del año. Los valores máximos de Cl-a se observan en otoño y los mínimos en primavera.

Estación	Media \pm std	Rango
Verano	39,79 \pm 25,58	10,10-105,98
Otoño	45,40 \pm 29,01	19,08-105,07
Invierno	29,33 \pm 14,47	8,68-58
Primavera	25,25 \pm 9,64	13-35,96

Tabla 1. Media, desvío estándar (std) y rango de Cl-a para el período bajo estudio.

En la Tabla 2 se pueden observar los coeficientes de correlación obtenidos para las variables estudiadas. Se consideraron diferentes operaciones de banda.

	Cl-a	LnCl-a
B1	-0,17	-0,12
B2	-0,13	-0,08
B1/B2	-0,66**	-0,77**
B2/B1	0,52**	0,56**
NDVI	-0,64**	-0,72**

Tabla 2. Coeficientes de Correlación de Pearson para la variable en estudio.

Dos estrellas indican un valor de significancia p menor que 0,01.

Con estos resultados, se modelaron diferentes algoritmos y se seleccionó aquel con mayor R^2 . La ecuación 2 muestra el modelo seleccionado ($R^2=0,66$).

$$(2) \quad LnCl - a = 5,47 - 2,02 * \frac{B1}{B2}$$

donde, $LnCl - a$ es el logaritmo natural de la concentración de clorofila-a ($\mu\text{g/l}$) y $\frac{B1}{B2}$ es la relación entre los valores de reflectancia de la banda 1 y la banda 2.

La Figura 2a muestra los valores estimados vs los valores observados con el modelo generado y la figura 2b muestra los valores estimados vs los valores observados obtenidos con el conjunto de datos para validación. En ambos gráficos se puede observar una buena asociación entre los datos.

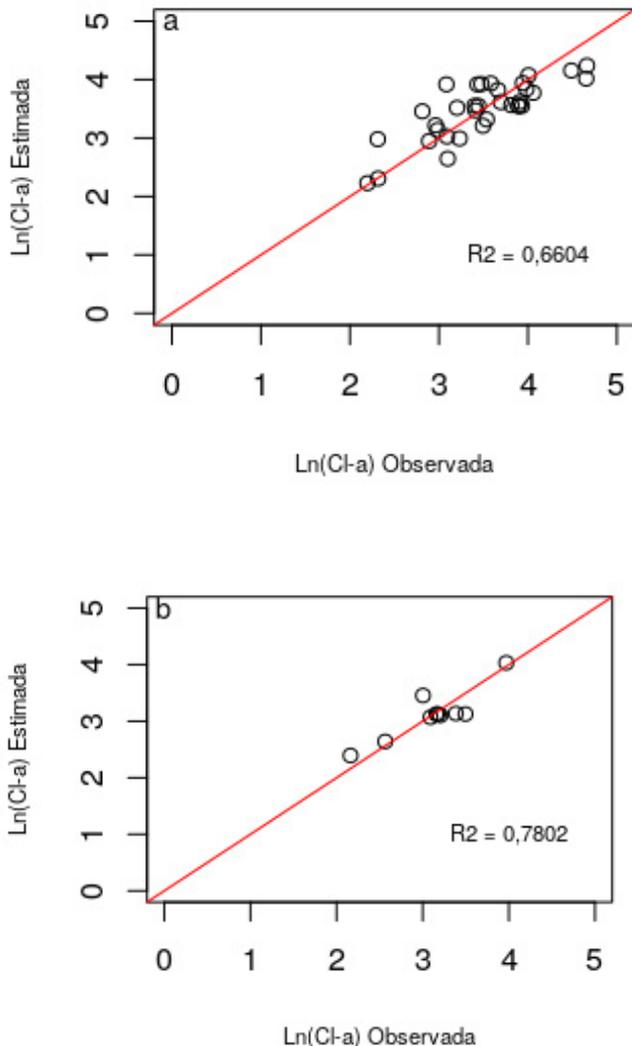


Figura 2. a) $\ln(\text{CI-a})$ estimada por el modelo vs. $\ln(\text{CI-a})$ observada a campo. **b)** Validación del $\ln(\text{CI-a})$ estimada por el modelo vs. $\ln(\text{CI-a})$ observada a campo.

Un modelo similar propusieron Germán *et al.* (2017), donde el algoritmo propuesto relaciona las

bandas del infrarrojo cercano y el rojo del visible del espectro electromagnético. Esto indica que la metodología puede ser extrapolada a otros reservorios. En otro estudio, se propuso un modelo para estimar diferentes parámetros de calidad de agua como la transparencia determinada con disco de Secchi (Shi *et al.*, 2018), donde obtuvieron un modelo con la banda 1 de MODIS con una correlación de 0,67.

Con el modelo obtenido, se calculó un valor de CI-a para cada día, libre de nubes, desde Enero de 2009 a Septiembre de 2019. Para una mejor visualización el $\ln(\text{CI-a})$ fue transformada con la función inversa del logaritmo natural (Figura 3). El gráfico muestra un claro comportamiento estacional, con picos en los meses de verano y valles en invierno. Esta tendencia es de esperar por los procesos de producción primaria limitados por la temperatura (Ferral *et al.*, 2017; Germán *et al.*, 2017). Se puede observar que en los últimos años la dispersión de los datos ha incrementado y, también, los valores de CI-a.

Podemos concluir que la degradación de la calidad del agua es uno de los principales problemas del planeta. La resolución temporal de MODIS permite realizar un análisis temporal de la calidad del agua del embalse Río Tercero. El modelo de regresión lineal simple obtenido a partir de datos de satélite y muestreos de CI-a proveen información significativamente consistente con buenas métricas ($R^2=0,66$). Con los datos diarios obtenidos desde el sensado remoto, se pueden llevar a cabo monitoreos continuos y así detectar florecimiento algales tempranamente. Las series de tiempo son una herramienta robusta para analizar la evolución del estado de un reservorio.

Este estudio puede ser útil para llevar a cabo políticas de prevención y mitigación extrapolables a otros sistemas para determinar la variabilidad temporal. Además, es una contribución original y relevante para el estudio de la calidad del agua de reservorios. Si bien, este trabajo, fue llevado a cabo para un período de tiempo corto, se podría extrapolar a un período de tiempo mayor.

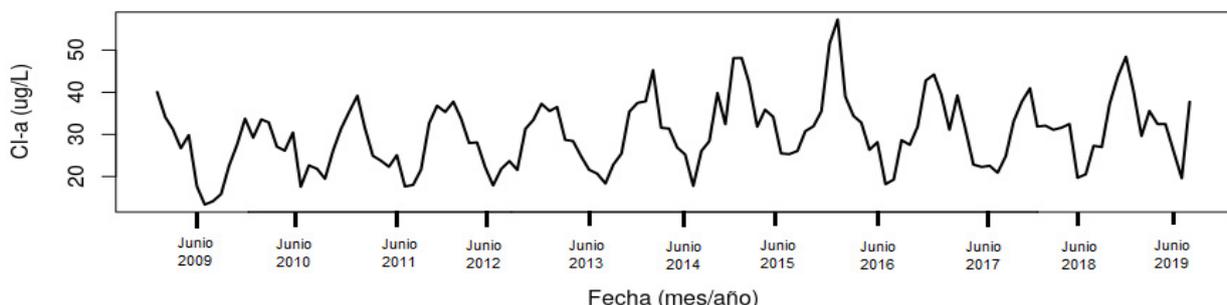


Figura 3. Serie de Tiempo de la CI-a para el punto central del embalse Río Tercero, periodo 2009-2019.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, A., (2000). ASCE. "Standard Methods for Water and Wastewater Examination and Test". APHA, AWWA, ASCE, New York.
- Bonanseña, M., Rodríguez, M. C., Pinotti, L., & Ferrero, S. (2015). Using multi-temporal Landsat imagery and linear mixed models for assessing water quality parameters in Río Tercero reservoir (Argentina). *Remote Sensing of Environment*, 158, 28-41.
- Ferral, A., Solis, V., Frery, A., Orueta, A., Bernasconi, I., Bresciano, J., & Scavuzzo, C. M. (2017). Spatio-temporal changes in water quality in an eutrophic lake with artificial aeration. *Journal of Water and Land Development*, 35(1), 27-40.
- Germán, A., Tauro, C., Scavuzzo, M. C., & Ferral, A. (2017). Detection of algal blooms in a eutrophic reservoir based on chlorophyll-a time series data from modis. In 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 4008-4011). IEEE.
- Khan, I., & Zhao, M. (2019). Water resource management and public preferences for water ecosystem services: a choice experiment approach for inland river basin management. *Science of the Total Environment*, 646, 821-831.
- Ledesma, M. M., Bonanseña, M., Ledesma, C. R., Rodríguez, C., Carreño, J., & Pinotti, L. (2019). Estimation of chlorophyll-a concentration using Landsat 8 in the Cassaffouth reservoir. *Water Supply*, 19(7), 2021-2027.
- Li, Y., Zhang, Y., Shi, K., Zhu, G., Zhou, Y., Zhang, Y., & Guo, Y. (2017). Monitoring spatiotemporal variations in nutrients in a large drinking water reservoir and their relationships with hydrological and meteorological conditions based on Landsat 8 imagery. *Science of the Total Environment*, 599, 1705-1717.
- Li, Z., Ma, J., Guo, J., Paerl, H. W., Brookes, J. D., Xiao, Y., ... & Lunhui, L. (2019). Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992–2016). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(3), 317-327.
- Neeley, S. (2018, December). Analyzing earth data with NASA's AppEEARS tool to improve research efficiency. In AGU Fall Meeting Abstracts.
- Prosperi, C. (2005). Evaluación de la Contaminación y Eutroficación de Aguas Superficiales de la Provincia de Córdoba.
- Rodríguez, C., Bonanseña, M., Bonatto, F., Reynoso, V., Prospero, C., Mancini, M. & Ledesma, C. (2007). Remote sensing-GIS to predict on the risk of eutrophication in aquatic systems. Space Technology-based tele-health project initiatives in Latin America and the Caribbean. United Nations Programme on Space Applications, 28-30.
- Shi, K., Zhang, Y., Zhu, G., Qin, B., & Pan, D. (2018). Deteriorating water clarity in shallow waters: Evidence from long term MODIS and in-situ observations. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 68, 287-297.