

In-Situ and Satellite Monitoring of Water Quality of an Eutrophic Lake with an Artificial Air Diffusion System

A. Ferral, Member IEEE-GRSS, E. Luccini, V. Solis, A. C. Frery, *Senior Member, IEEE*, A. Aleksinko, I Bernasconi, C. M. Scavuzzo, Member IEEE-GRSS

Abstract- The effect of an underwater artificial air diffusion system on the water quality of Embalse San Roque, Córdoba-Argentina is assessed by means of a temporal-spatial analysis, for 2008-2011, through field data and LANDSAT5-TM satellite imagery. The temperature estimated using TM6 band, resulting with a determination coefficient of 0.94 and a mean square error of 0.4°C. A multiple regression model was used to calculate the logarithm of chlorophyll-a concentration by means of TM1 and TM4 bands, obtaining a determination coefficient of 0.64 which was validated with a control group with an agreement of 83%. The processed images show the localized effect of the underwater artificial air diffusion system, improving the water quality in their neighbors.

Keywords: Eutrophication, chlorophyll-a, artificial aeration, LANDSAT, San Roque lake

I. INTRODUCCION

LOS LAGOS evolucionan a lo largo de miles de años, transformándose primero en pantanos y finalmente en llanuras. Este proceso se denomina eutrofización natural. Los efluentes urbanos, industriales y la actividad agraria, entre otros, aportan cantidades importantes de nutrientes a los cuerpos de agua continentales y aceleran este proceso de manera formidable. Una de las consecuencias principales de este fenómeno es la liberación de toxinas, en particular microcistinas, que pueden afectar tanto a la vida acuática como a la salud de la población. Para mitigar este fenómeno en el Embalse San Roque la provincia de Córdoba, con la ayuda de la Nación, instaló en octubre del año 2008 una red de aireadores con el objetivo de reducir la estratificación térmica. El objetivo de esta intervención es favorecer el mezclado y aumentar el nivel de oxígeno en el fondo para evitar la

liberación de fosfatos desde el sedimento, limitando de esta manera la concentración de nutrientes disponibles. Se implementó desde entonces un plan de monitoreo mensual de una serie de variables biogeoquímicas para controlar la evolución temporal de la calidad del agua del Embalse y la eficacia del sistema de aireación artificial. Además, la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba firmó con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina, un convenio de cooperación para utilizar imágenes satelitales como herramientas de monitoreo. Las técnicas de teledetección aplicadas al estudio de calidad de agua poseen la gran ventaja de proveer una alta cobertura espacial y temporal que de otra manera sería imposible de lograr. Esto no sólo se debe al gran costo de los análisis químicos involucrados en una investigación de campo, sino también a la imposibilidad práctica de realizar un muestreo con alta densidad de puntos durante una dada jornada de trabajo. El proceso de fotosíntesis regula la química de las aguas productivas y éste posee una dinámica circadiana muy sensible a factores ambientales como radiación solar y temperatura [1,2]. Por ello, obtener información espectral simultánea de un lago reduce el margen de error para el estudio de patrones espaciales [3,4], aspecto clave en la evaluación de los efectos del sistema de aireación artificial sobre diferentes variables biogeoquímicas del Embalse San Roque.

II. MATERIALES Y METODOS

Zona de Estudio: El Embalse San Roque presenta su baricentro superficial en coordenadas 31° 22' 56" S, 64° 27' 56" O, está situado aproximadamente a 600 msnm en el Valle de Punilla, provincia de Córdoba, en la alta cuenca del Río Suquía. Su área de drenaje comprende una superficie de 1750 km², recibiendo el aporte de cuatro tributarios: los ríos San Antonio y Cosquín junto con los arroyos Los Chorrillos y Las Mojarras, sumados al pequeño aporte debido al perillago. A su vez cuenta con un único emisario, el Río Suquía. Un primer dique fue construido en el año 1888, reemplazado por el actual paredón en 1944 para aumentar el volumen de almacenamiento.

A. Ferral, Instituto Gulich, anabella.ferral@gmail.com
 E. Luccini, CONICET, eluccini@ceprocor.uncor.edu
 V. Solis, Universidad de Córdoba, veliamatilde@gmail.com
 A. C. Frery, Universidad de Alagoas, acfrery@gmail.com
 A. Aleksinko, Sec. Rec. hídricos Pcia. Cba, aaleksinko@gmail.com
 I Bernasconi, Sec. Rec. hídricos Pcia. Cba, iabernasconi@gmail.com
 C. M. Scavuzzo, Instituto Gulich, scavuzzo@conae.gov.ar
 Corresponding author: M. C. Scavuzzo

Sistema de aireación artificial: Las características mecánicas de los aireadores instalados en el Embalse San Roque son diferentes según la profundidad del lago en la que se encuentran. En total son siete aireadores de 1 km de largo cada uno. El primero se ubica en la zona más profunda del lago (Garganta) y ha sido diseñado para distribuir 233 L/s de aire con una presión de 500 kPa a través de cien conglomerados que cuentan con siete perforaciones cada uno. Los demás aireadores han sido ubicados en zonas bajas, 15 m por encima de la zona más profunda, y tienen una capacidad de distribución de 700 L/s de aire, a través de 2.750 clusters con una perforación cada uno. Para ello se cuenta con tres compresores capaces de repartir cada uno 233 L/s de aire a una presión aproximada de 400 kPa. La puesta en marcha de los 4 compresores Kaeser para la aplicación del sistema comenzó el 4 de octubre de 2008. Los aireadores no siempre funcionaron a plena potencia de manera continua en el tiempo debido a problemas técnicos en algunos compresores y a paradas por mantenimiento.

Datos de campo: Los datos de campo que se utilizaron en el presente trabajo fueron recolectados y generados en el contexto del plan de monitoreo que realiza la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba. El diseño de monitoreo adoptado en el mismo, se elaboró considerando los términos de referencia del convenio firmado oportunamente con la Secretaría de Ambiente de la Nación. Esta metodología es concordante con el modelo propuesto por la EPA (*Environmental Protection Agency*) para el monitoreo de lagos con sistemas de aireación artificial y está descrita en [5]. En dicho plan de monitoreo se miden numerosas variables, de las cuales sólo se utilizaron en este trabajo: -Una variable temporal: Fecha de la Medición - Una variable espacial: Posición de coordenadas geográficas. -Una variable fisicoquímica medida en el laboratorio: concentración de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) y una variable fisicoquímica medida in-situ: Temperatura superficial. Las estaciones de muestreo de calidad de agua se ubicaron teniendo en cuenta la localización de los difusores, ya que fue planeado para monitorear la efectividad de los mismos y el uso de imágenes satelitales según lo acordado entre la Secretaría de Recursos Hídricos y la CONAE. Se definieron tres puntos sobre la zona de actuación de los difusores (Zona A, Zona B y Garganta), un punto central del embalse para evaluar el alcance de su efecto (Centro) y cuatro puntos periféricos pero alejados de las costas para utilizar en el análisis satelital (SAT 1, SAT 2, SAT 3 y SAT 4). Su localización se observa en la Figura 1.

Datos satelitales: Se utilizaron mediciones de radiancia por el sensor Thematic Mapper (TM) a bordo del satélite LANDSAT-5, en órbita desde 1984, en particular las bandas TM1 (azul, 0.452-0.518 μm), TM4 (IR cercano, 0,776-0,904 μm) TM6 (IR térmico, 10.40-12.50 μm). Se trabajó con datos de reflectancia al tope de la atmósfera para las bandas TM1 y TM4 y con temperatura de brillo en el caso de TM6 calculadas a partir de la metodología presentada por Chander y colaboradores mediante un programa implementado en la plataforma R [6]. No se realizó corrección del efecto de dispersión de aerosoles atmosféricos. Se trabajó con la escena 228/82 de fechas que coincidieron con el monitoreo de campo para elaborar los modelos semi-empíricos de concentración de

clorofila-a y temperatura (12-11-2008, 14-12-2008, 30-12-2009, 16-02-2009, 04-03-2009, 20-03-2009, 05-04-2009, 07-05-2009, 08-06-2009, 28-09-2009, 27-08-2009, 03-02-2010, 10-03-2011). Además, se analizaron imágenes de verano del período 2004 al 2011 para evaluar cambios espaciales debido a la incorporación del sistema de aireación (18-01-2004; 20-01-2005; 08-02-2006; 11-02-2007; 03-01-2008; 16-02-2009; 21-01-2011).

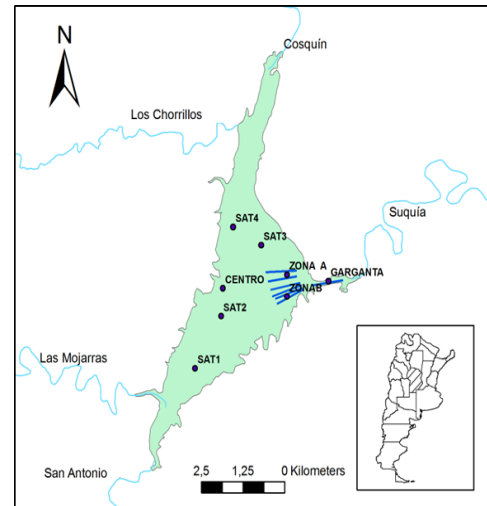


Figura 1: Embalse San Roque (baricentro en $31^{\circ} 22' 56'' S$, $64^{\circ} 27' 56'' O$). Los círculos negros corresponden a los puntos de monitoreo en campo y las líneas celestes a los ejes de actuación de los difusores instalados.

Modelado de variables geofísicas: Se emplearon modelos de regresión lineal simple para calcular temperatura (en $^{\circ}\text{C}$) a partir de la banda TM6 (Ecuación 1) y de regresión lineal múltiple para determinar clorofila-a a partir de las bandas TM1 y TM4 (Ecuación 2). En ambos casos se separaron el 20% de los datos, grupo control, para validar los modelos obtenidos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado semi-empírico de temperatura superficial del lago

La Figura 2 (superior) muestra los valores de temperatura superficial del agua, medidos in situ en función de la temperatura de brillo obtenida de los datos satelitales, junto con la recta de ajuste, r^2 es igual a 0.94. Parte de la incerteza se puede atribuir a la no realización de correcciones atmosféricas de la banda TM6 y al valor estimado de emisividad. La regresión obtenida para determinar valores de temperatura a partir de la banda TM6, fue validada mediante un grupo control de 15 pares de datos, cuya gráfica se observa en la Figura 2 (inferior), obteniendo un excelente acuerdo con r^2 igual a 0.97 y un error cuadrático medio de 0.4°C .

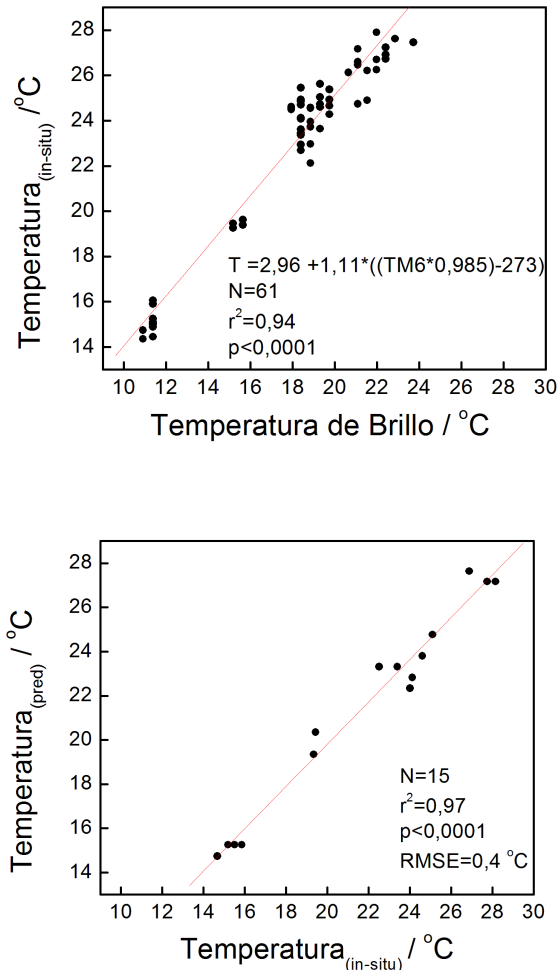


Figura 2 (arriba) Regresión lineal entre temperatura del Embalse medida in situ en función de la temperatura de brillo de la banda TM6 corregida por el factor de emisividad y expresada en grados centígrados. (abajo) Validación del modelo propuesto: Temperaturas modeladas a partir de datos satelitales de la banda TM6 en función de valores medidos in situ no utilizados para generar el modelo.

Modelado semiempírico de la concentración de clorofila-a del lago

Estudios previos demostraron que la concentración de clorofila-a del Embalse San Roque puede ser monitoreada mediante el sensor TM del satélite Landsat-5 debido a que no pertenece a la clasificación de Morei, Tipo II [6]. Mediante la técnica de regresión lineal múltiple se definió un modelo de concentración de clorofila-a a partir de datos satelitales de reflectancia. El análisis de los coeficientes de correlación de Pearson del conjunto completo de datos permitió observar que el logaritmo de la concentración de clorofila-a correlaciona significativamente con las bandas del visible. Además el mismo estudio por fecha mostró que la banda TM4 también presenta significativa correlación. La Figura 3 (superior) presenta el gráfico de los valores inferidos satelitalmente y las mediciones de campo. Se obtuvo un r^2 igual a 0.64 para el modelo obtenido.

La Figura 3 (inferior) muestra los mismos parámetros graficados para las mediciones experimentales del grupo de datos de validación, obteniéndose r^2 igual a 0.83.

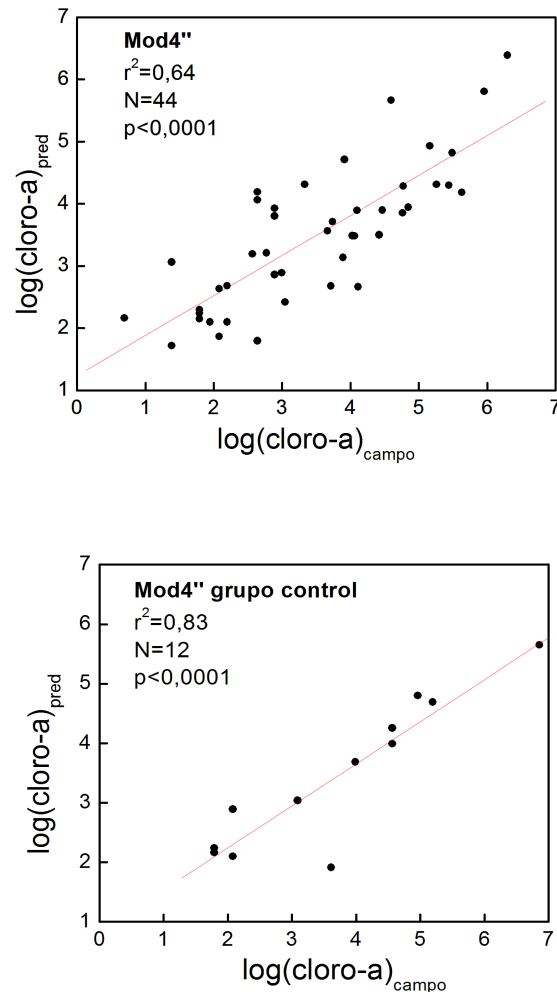


Figura 3. (arriba) Regresión lineal entre concentración de clorofila-a del Embalse medida in situ en función de concentración de clorofila-a calculada a partir de la reflectancia de las bandas TM1 y TM4 según el modelo propuesto. Log es logaritmo natural. (abajo) Validación del modelo propuesto.

Elaboración de Mapas

La Figura 4 muestra la secuencia en el procesamiento de datos para obtener los mapas de temperatura y clorofila-a del Embalse San Roque, para el periodo noviembre de 2008 - febrero de 2010.

La Figura 5 presenta los mapas de temperatura a partir de la banda TM6 obtenida bajo el procesamiento propuesto. La escala fija de temperaturas entre 14 y 28 °C abarca el rango de valores medidos in situ en el periodo analizado. La concentración de clorofila-a se determinó aplicando el modelo de regresión lineal múltiple al procesamiento de las bandas TM1 y TM4.

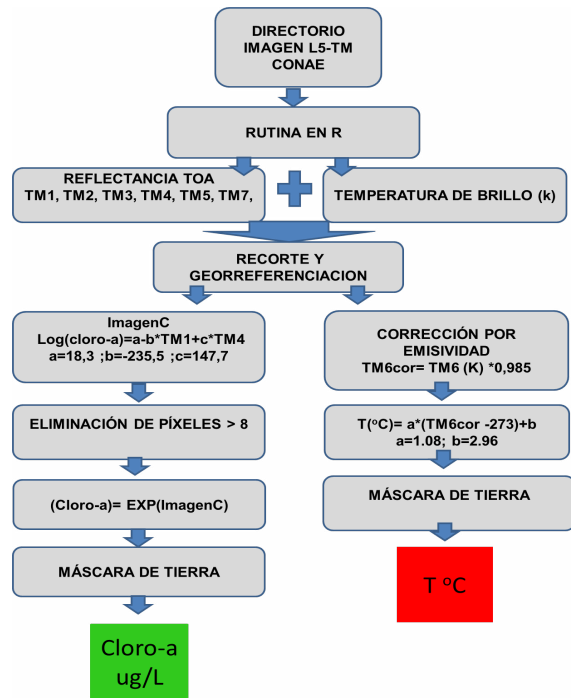


Figura 4: Secuencia de procesamiento de datos para obtener mapas de temperatura y clorofila-a del Embalse San Roque.

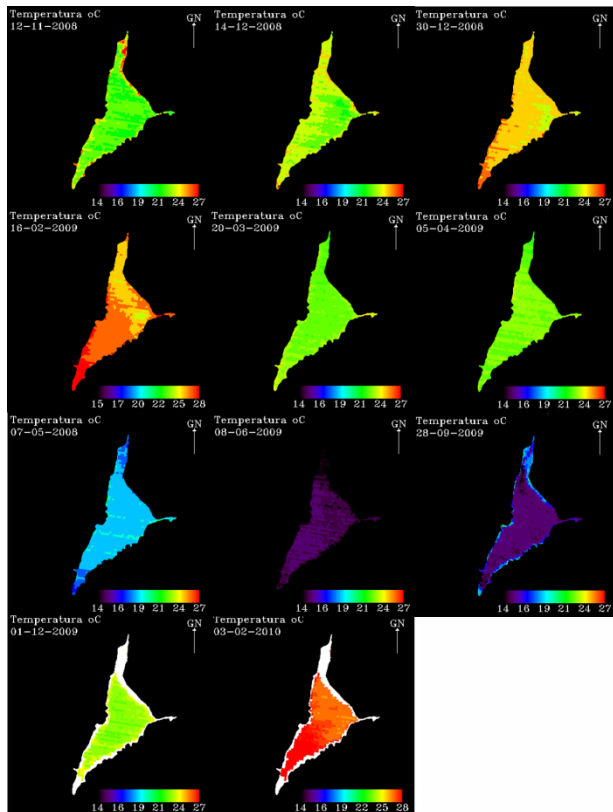


Figura 5: Mapas de temperatura a partir de la banda TM6 LANDSAT-5TM en el periodo noviembre de 2008-febrero de 2010. Las zonas blancas de los últimos mapas corresponden a tierra firme por disminución de cota.

La Figura 6 muestra un ejemplo de mapa de eutrofización del Lago. Para ello se calculó el índice de eutrofización de Carlson [7], $TSI = 30,6 + 9,81 \ln([\text{clorofila-a}]/\mu\text{g/L})$, a partir de un mapa de clorofila-a obtenido mediante el algoritmo "Mod4" y luego se aplicó un árbol de decisión para realizar la clasificación. Se eligió la fecha 03/02/2010 debido a que el monitoreo in situ registró valores de clorofila-a muy diferentes en la zona norte y sur del Embalse. El mapa coincide con los niveles detectados por mediciones de campo, eutrófico en el norte, centro y este del Embalse e hipertrófico en el sur.

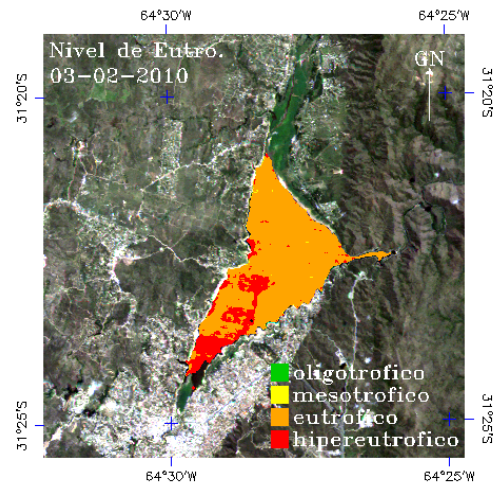


Figura 6: Mapa de nivel de eutrofización del Embalse San Roque elaborado a partir de una imagen LANDSAT-5TM con fecha 03/02/2010. Los datos de campo de clorofila-a de los distintos sitios de monitoreo para esa fecha son: Zona Sur: SAT1=542 $\mu\text{g/L}$; SAT2=230 $\mu\text{g/L}$; Zona Centro=61 $\mu\text{g/L}$; Zona Este: ZA=30 $\mu\text{g/L}$; Zb=54 $\mu\text{g/L}$ y Zona Norte: SAT3= 58 $\mu\text{g/L}$ y SAT4=49 $\mu\text{g/L}$.

La Tabla 1 presenta los datos de las Fechas de medición, Valores medios de clorofila-a, TSI (Índice de Eutrofización de Carlson) y nivel de eutrofización, obtenidos mediante monitoreo satelital y de campo. Además se incluye el error porcentual de TSI del dato satelital respecto de la medición in-situ. Se observa que la clasificación de nivel de eutrofización realizada a partir de datos satelitales es en todos los casos igual o de menor valor que la obtenida a partir de datos de campo. Se observa que el satélite permitió dar una referencia sobre el nivel de eutrofización del embalse confiable, con un error menor o igual al 15 % para las fechas analizadas y un error promedio del 8%. Por otro lado, en ningún caso se sobreestimó el nivel de eutrofización. Además se analizó el coeficiente de determinación entre el valor promedio de clorofila-a del lago medida en campo (Clorofila-a media In situ) y el calculado mediante el Modelo (Clorofila-a media satelital) y se obtuvo un coeficiente de determinación igual a 0,72 y un $p < 0,001$.

Efecto del sistema de aireación en el índice NDVI del Embalse

El NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) es un índice utilizado para realizar estudios de vegetación a partir de datos satelitales. Éste varía entre -1 y 1 presentando valores

negativos en zonas cubiertas por agua y valores positivos en tierra, siendo mayor a 0,5 cuando la vegetación es vigorosa. El Embalse San Roque presenta un importante contenido de algas verdes. Dado que en bibliografía se reporta la existencia de una relación directa entre concentración de clorofila-a en aguas y NDVI [8,9], se investigó esta relación a partir del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson positivo igual a 0.45 entre la concentración de clorofila-a medida en campo y el NDVI calculado en los sitios presentados en la Figura 1, con un nivel de significancia $p < 0,001$.

TABLA I:

FECHA, VALORES MEDIOS DE CLOROFILA-A, TSI (ÍNDICE DE EUTROFIZACIÓN DE CARLSON) Y NIVEL DE EUTROFIZACIÓN, OBTENIDOS POR MONITOREO SATELITAL Y DE CAMPO (COLUMNAS 2 A 7) Y ERROR PORCENTUAL DE TSI DEL DATO SATELITAL RESPECTO DE LA MEDICIÓN IN-SITU (COLUMNA 8).

Fecha	Clorofila-a media In situ (ug/L)	Clorofila-a media Satelital (ug/L)	TSI medio in situ	TSI in medio satelital	Nivel de Eutrofización medio-in situ	Nivel de Eutrofización Medio-satelital	Error porcentual %
12/11/2008	20,7	20,0	60,3	60,0	eutrófico	eutrófico	< 1
14/12/2008	102,9	53,9	76,0	69,7	hipereutrófico	eutrófico	- 9
30/12/2008	72,12	70,4	72,5	72,3	hipereutrófico	hipereutrófico	- 1
16/02/2009	243,4	254,2	84,4	84,9	hipereutrófico	hipereutrófico	< 1
20/03/2009	137,5	32,2	78,9	64,6	hipereutrófico	eutrófico	- 12
05/04/2009	12,4	23,21	55,3	61,4	eutrófico	eutrófico	+ 11
07/05/2009	8,7	4,64	51,8	45,6	eutrófico	meso	- 13
28/09/2009	18,2	3,5	59,0	42,9	eutrófico	meso	- 14
01/12/2009	39,1	27,7	66,5	63,2	eutrófico	eutrófico	- 3
03/02/2010	131,0	46,0	78,4	68,1	hipereutrófico	Eutrófico	- 15
Promedio de error porcentual							8

La Figura 7 presenta un gráfico de los valores promedio del NDVI de 400 píxeles correspondientes a la zona CENTRO, por un lado, y a la zona de influencia de los difusores (ZA y ZB) por otro. Las fechas de las imágenes de verano de cada año se presentan en la sección de materiales y métodos. Se observa que desde el verano 2004 hasta el verano 2008 los valores medio de NDVI fueron mayores en la zona de los difusores que en el centro. Esto se debe a que el agua en esa región corre lento y por lo tanto la proliferación algal es mayor en esas condiciones. Por ese motivo se diseñó la red de aireación priorizando ese sector. A partir del verano del año 2009, se observa un cambio en el comportamiento relativo entre ambas zonas, presentando mayores valores de NDVI la región central. La Tabla 2 presenta los resultados de la prueba de media *T-Test* entre los datos del centro y de la zona de difusores. Se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0,01$) en todas las fechas, excepto para el año, 2007 ($p < 0,017$) y 2010. Se realizó el mismo estudio entre el centro y los demás sitios de monitoreo y no se observaron diferencias significativas en ningún caso. Por este motivo se puede adjudicar el cambio de comportamiento del lago a la intervención del sistema artificial en la zona de actuación del sistema, observándose una menor proliferación algal en el sitio donde históricamente se registraba la mayor productividad fotosintética.

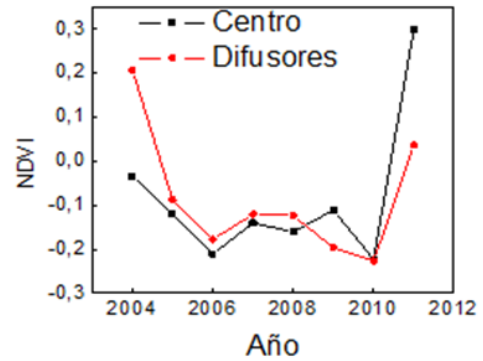


Figura 7: Gráficos de valores medios de NDVI en función del año para las zonas CENTRO y Difusores (ZA + ZB). Los valores de NDVI medios se obtienen de un cuadrado de 400 x 400 píxeles que comprenden la zona de estudio en cada caso. En color rojo se muestran los datos correspondientes a la zona de difusores y en negro a la región central.

TABLA II:

VALORES PROMEDIO DE NDVI SOBRE MUESTRAS DE 400 PÍXELES DE DOS ZONAS DEL EMBALSE

Año	NDVI _{medio} Centro	NDVI _{medio} Difusores	<i>p</i>
2004	-0,034	0,206	<0,000
2005	-0,121	-0,088	<0,000
2006	-0,211	-0,177	<0,000
2007	-0,141	-0,121	0,017
2008	-0,160	-0,124	<0,000
2009	-0,112	-0,197	<0,000
2010	-0,223	-0,226	0,283
2011	0,298	0,036	<0,000

La Figura 8 presenta cuatro mapas del Embalse San Roque con fecha 16/02/2009. Figura 8 (superior izquierda) corresponde a una imagen en visible donde se observan definitivamente las líneas de los aireadores funcionando. La Figura 8 (superior derecha) presenta la variable Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Valores de NDVI bajos en la zona de los difusores indican menor presencia de algas. La Figura 8 (inferior izquierda) corresponde a Temperatura. Al Este del Embalse se aprecia un círculo más oscuro, debido al ascenso del agua fría del fondo hacia la superficie causada por los difusores. Se realizó una prueba de diferencia de medias mediante la prueba *T-Test* para dos conjuntos de datos de 400 píxeles cada uno y se comprobó que la temperatura en la zona de los difusores es significativamente menor que en el Centro indicando que la estratificación térmica se rompe siendo 25,4 °C y 27,0 °C respectivamente. La Figura 8 (inferior derecha) muestra la concentración de clorofila-a, análogo al de NDVI.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un estudio satelital de los efectos de un sistema de aireación artificial instalado en el año 2008 en el Embalse San Roque. Si bien existen antecedentes del uso de esta herramienta en el mismo cuerpo de agua [10], este

análisis ha permitido obtener conclusiones diferentes y relevantes respecto a las reportadas previamente. Se observan efectos benéficos localizados en la zona de los aireadores, que implican el mezclamiento del agua y una menor prevalencia de biomasa algal, en coincidencia con el análisis de datos de campo. Esto es muy importante ya que habilita a realizar un seguimiento satelital de los cambios térmicos y químicos causados por los aireadores.

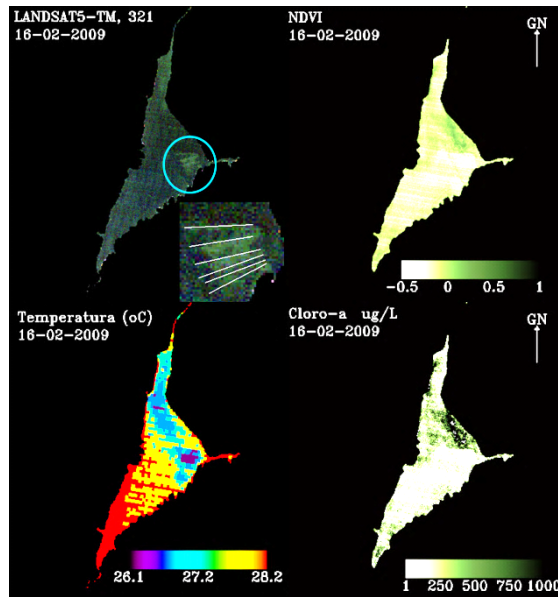


Figura 8: Imagen LANDSAT-5TM adquirida el 16/02/2009 correspondiente a la zona del Embalse San Roque. Superior izquierda: Combinación de bandas 321 (ampliación zona de difusores). Superior derecha: Mapa de NDVI. Inferior izquierda: Mapa de Temperatura. Inferior derecha: Mapa de clorofila-a.

El modelo de regresión lineal simple utilizado para calcular temperatura del Embalse a partir de la banda TM6 arroja un $r^2 = 0.94$ y RMSE de $0.4\text{ }^\circ\text{C}$. Se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple para calcular logaritmo de clorofila-a a partir de las bandas TM1 y TM4 con un r^2 igual a 0.64 y se validó el modelo con un grupo control con un 83% de acuerdo.

Se observó una correlación significativa entre los valores promedio de temperatura medidos en campo y los calculados satelitalmente a partir de una región representativa del Embalse para un grupo de datos control. Se obtuvo un coeficiente r^2 igual a 0.97 . Se observó una correlación con r^2 igual a 0.72 entre los valores promedio de clorofila-a medidos en campo y los calculados satelitalmente a partir de una región representativa del Embalse. La clasificación de imágenes de concentración de clorofila-a posibilitó la elaboración de mapas de nivel de eutrofización del Embalse.

Se demostró que el efecto del sistema de aireación artificial sobre el Embalse San Roque es observable satelitalmente, tanto en color real como en imágenes procesadas de NDVI, clorofila-a y temperatura, visualizándose la ruptura de la estratificación térmica y evidenciando que el sistema de aireadores mejora la calidad del agua en su entorno reduciendo la proliferación de biomasa algal en esas zonas. Se observa que el satélite puede dar una referencia sobre el nivel de eutrofización del embalse confiable con un error porcentual promedio igual al 8% . Por otro lado, para el

período analizado, el modelo propuesto no sobreestima el nivel de eutrofización.

Se observa que la elaboración de mapas de eutrofización puede ser automatizada fácilmente en un futuro debido a que todos los pasos, excepto la georreferenciación y el recorte de la zona de estudio, han sido programados y pueden ser ejecutados sin ver las imágenes. Actualmente se está llevando a cabo esa tarea para datos obtenidos por los sensores a bordo del satélite LANDSAT 8 [10]. La disponibilidad de mapas de nivel de eutrofización periódicos puede convertirse en una herramienta de gestión del recurso hídrico importante. Estos permitirán diseñar estrategias de respuesta y alerta temprana a emergencias o evaluar proyectos en marcha, como es el caso del sistema de aireación artificial.

REFERENCIAS

- [1] V. Estrada, and M. S. Diaz, "Global sensitivity analysis in the development of first principle-based eutrophication models," *Environmental Modelling and Software*, vol. 25, pp. 1539-1551, 2010.
- [2] D. A. Nimick, C. H. Gammons, and S. R. Parker, "Diel biogeochemical processes and their effect on the aqueous chemistry of streams: A review," *Chemical Geology*, vol. 283, pp. 3-17, 2011.
- [3] E. Alcántara, et al., "Environmental factors associated with long-term changes in chlorophyll-a concentration in the Amazon floodplain," *Biogeosciences Discussions*, vol. 8, pp. 3739-3770, 2011.
- [4] E. M. Novo, and M. Godoy Jr., "Eutrophication assessment through remote sensing techniques," Technical report, INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais), Sao Paulo, Brasil, pp. 2825-2828, 1989.
- [5] A. Ferral, "Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el Embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales," Tesis de Maestría. Facultad de Matemática, Astronomía y Física, UNC, 2013.
- [6] G. Chander, B. L. Markham, and D. L. Helder, "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113(5), pp. 893-903, 2009.
- [7] R. E. Carlson, "A trophic state index for lakes," *Limnology and oceanography*, vol. 22(2), pp. 361-369, 1977.
- [8] C. Hu, "A novel ocean color index to detect oating algae in the global oceans," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113(10), pp. 2118-2129, 2009.
- [9] L. M. Kiage, and N. D. Walker, "Using NDVI from MODIS to monitor duckweed bloom in Lake Maracaibo, Venezuela," *Water Resources Management*, vol. 23(6), pp. 1125-1135, 2009.
- [10] R. Fernandez, M. Bonansea, A. Cosavella, F. Monarde, M. Ferreyra, and J. Bresciano, "Effects of bubbling operations on a thermally stratified reservoir: implications for water quality amelioration," *Water Science & Technology*, vol. 66(12), pp. 2722-2730, 2012.
- [11] Pahlevan, N., Lee, Z., Wei, J., Schaaf, C. B., Schott, J. R., & Berk, A. (2014). On-orbit radiometric characterization of OLI (Landsat-8) for applications in aquatic remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 154, 272-284.



Anabella Ferral born in 1976 in Argentina, she is graduate in chemistry with a PHD in chemistry and a master in remote sensing. She is professor in the University Blas Pascal in Cordoba Argentina and Head of the Master on Space Application of the Gulich Institute a joint program between the national space agency and the University of Cordoba. She was in charge of GIS and remote sensing issues in the hydric resource secretary in the Cordoba Argentine Government.



Carlos M. Scavuzzo. PhD in Physics from the University of Cordoba on atmospheric physics and cloud modelling, with a Post-Doctorate degree at Ecole Polytechnique of Paris, France. At present he is a Professor at the National University of Cordoba, Argentina, and member of response team in the Argentinean space Agency. From its creation in 2007 to 2014 he was a head of the first postgraduate program of the Argentinean Space Agency on Emergencies Early Warning Response Space Applications. First Chair of the IEEE-GRSS Argentinean Chapter.



Eduardo Luccini is researcher since 2005 at the National Council of Scientific and Technical Research (CONICET) of Argentina. He obtained his Physics Degree at the National University of Córdoba in 1996 in the specialty of Atmospheric Physics, and his PhD. at the National University of Rosario, Argentina, in 2003. From 2003 to 2005 he was post-doctoral researcher with a CONICET grant, including an external research CONICET travel grant developed at University of Tarapacá, Arica, Chile. His fields of study include the atmospheric ozone layer, the solar radiation at the Earth, particularly the UV range, and related parameters such as clouds and aerosols. Presently he works for CONICET at CEPROCOR, Córdoba Province, Argentina, and makes degree and post-degree teaching at Catholic University of Rosario, Argentina.

Alejandro Aleksinko. Civil Engineer working in the in the hydric resource secretary in the Cordoba Argentine Government with a large experience in operational issues on water resource at provincial level.



Alejandro C. Frery received the B.S. degree in electronic and electrical engineering from the University of Mendoza, Mendoza, Argentina; the M.Sc. degree in applied mathematics (statistics) from National Institute for Pure and Applied Mathematics, Rio de Janeiro, Brazil; and the Ph.D. degree in applied computing from National Institute for Space Research, São José dos Campos, Brazil. He is currently with the Institute of Computing, Federal University of Alagoas, Maceió, Brazil. His research interest include statistical computing.

Ines Bernasconi, civil engineer and head of in the , hidrological department of the Hydric Resource Secretary of the Cordoba Argentine Government with a large experience in operational issues on water resource at provincial level.

Velia Solis, got her PhD in physical chemistry. After a postdoctoral stage at the lectrochemistry Group at Southampton University, England, she got an assistant professor position in 1983 in the Department of Physical Chemistry of the Faculty of Chemical Sciences at the National University of Córdoba, Argentina. In the same department she became associate professor in 1990 and full professor in 1993 and head of the faculty during several years. Her research has been devoted to bioelectrochemistry and electroanalytical chemistry in general, and to the applications of electrochemical methods to trace analysis and biosensors, including basic studies. In the last time she focused on environmental physical chemistry assessment.