

Programa de monitoreo de calidad de agua del Embalse Los Molinos, Córdoba - Argentina

Raquel Bazán^{1,2}, Nancy Larrosa¹, Matías Bonansea³, Abel López^{1,4}, Fanny Busso⁵ y Ana Cosavella^{1,6}

¹*Departamento de Química Industrial y Aplicada, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina*

²*Instituto Superior de Estudios Ambientales (ISEA-UNC), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina*

³*CONICET, Cátedra Ecología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.*

⁴*Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina*

⁵*Aguas Cordobesas S.A., Córdoba, Argentina*

⁶*Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia, Córdoba, Argentina.*

Fecha de recepción del manuscrito: 28/12/2013

Fecha de aceptación del manuscrito: 25/07/2014

Fecha de publicación: 10/09/2014

Resumen—Con el objetivo de determinar la calidad de agua y el estado trófico del embalse Los Molinos, en el año 1999 se iniciaron monitoreos estacionales. Los muestreos fueron conducidos por la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba con la participación de la actual Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia.

En el año 2001 se incorporó la empresa Aguas Cordobesas S.A. para ampliar las variables medidas y aumentar la frecuencia de monitoreo. Desde el año 2005 se observó un cambio en el uso del suelo de la cuenca, lo cual originó la obtención del mapa de cobertura de la cuenca. Debido a las floraciones de cianobacterias se consideró necesario evaluar la calidad del agua para recreación, con la participación del Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua. En el año 2012 se rediseñó el monitoreo, incorporándose el embalse La Quintana y el canal Los Molinos-Córdoba el cual es utilizado para potabilización y abastecimiento de las localidades aledañas y de una parte de la ciudad de Córdoba y riego.

Los estudios realizados señalan al embalse Los Molinos como un cuerpo de agua monomítico cálido, mesotrófico a eutrófico, con floraciones recurrentes de cianobacterias, deterioro de la calidad de sus aguas en primavera verano, reducción de los pastizales y zonas boscosas, marcada presión antropogénica por la instalación creciente de asentamientos urbanos y turísticos sin planificación ni control.

Palabras clave—embalse, diseño, monitoreo, calidad de agua

Abstract—In order to determine the water quality and trophic status of the reservoir Los Molinos, seasonal monitoring began in 1999. Sampling was conducted by the Faculty of Exact, Physical and Natural Sciences of the National University of Córdoba with the participation of the current Secretary of Water Resources and Coordination of the Province.

In 2001 the company Aguas Cordobesas S.A. joined to expand measured variables and increase the frequency of monitoring. Since 2005 a change was observed in the use of the land in the basin, which resulted in obtaining coverage map of the basin. Because of the cyanobacterial *blooms* it was considered necessary to evaluate water quality for recreation, with the participation of the Centre for the Semi-Arid Region of the National Water Institute. In 2012 monitoring was redesigned, incorporating the reservoir La Quintana and Los Molinos-Córdoba canal, which is used for irrigation and supply of nearby towns and part of the Córdoba city.

Studies point to Los Molinos reservoir as a warm monomictic water body, mesotrophic to eutrophic, with recurrent cyanobacterial *blooms*, impaired water quality in summer and spring, reduced pasture and wooded areas, strong anthropogenic pressure by growing of urban settlements and tourist facilities without planning or control.

Keywords—reservoir, design, monitoring, water quality

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Córdoba y zona de influencia satisface sus requerimientos de agua desde dos cuencas principales. La primera y mayormente utilizada es la cuenca del río

Suquía, y la segunda en importancia, la cuenca del río Xanaes (mediante el trasvase por el canal Los Molinos-Córdoba); abasteciendo un 70 y 30 % de la ciudad, respectivamente. La ciudad de Córdoba, se encuentra en la región central de la provincia homónima con una población de 1.330.000 habitantes y 224.000 en la zona del gran Córdoba; según datos del último censo (INDEC, 2010). El abastecimiento hídrico de la región se realiza en forma directa desde la cuenca del río Suquía, cuyo almacenamiento principal es el embalse San Roque. Este cuerpo de agua manifiesta desde hace unas décadas un

Dirección de contacto:

Raquel Bazán, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 4333078, rbazan@efn.uncor.edu

eminente grado de deterioro de la calidad de sus aguas y avance del proceso de eutrofización (Ruiz *et al.*, 2011). Es así, que la cuenca del río Xanaes, es considerada la segunda fuente de abastecimiento para la ciudad. Rodríguez *et al.* (1999), Moya *et al.* (2002) y Castelló *et al.* (2000) señalan que los aportes de la misma pueden satisfacer las demandas futuras de la región con mayor seguridad y reduciendo los períodos críticos durante las épocas de sequía. La Figura 1 muestra la ubicación de las dos cuencas hídricas y del Canal Los Molinos.

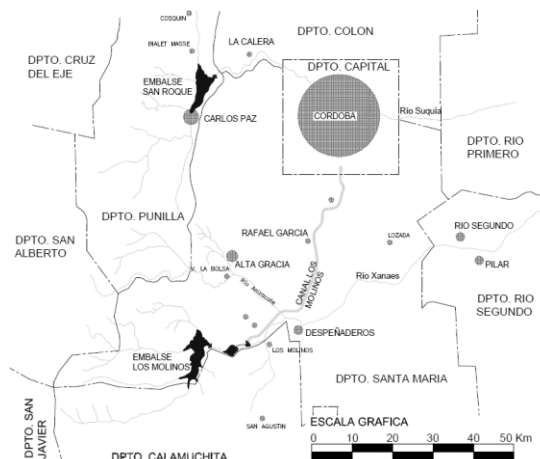


Fig. 1: Ubicación geográfica de las cuencas Suquia y Xanaes. Fuente Castelló (2009).

El subsistema Xanaes tiene como principal fuente al embalse Los Molinos formado por el aporte de sus cuatro tributarios principales: Los Reartes, del Medio, Los Espinillos y San Pedro, con una superficie del espejo de agua de 2.110 ha que actúa como reservorio de una cuenca de 978 km². Su efluente el río Los Molinos posee un módulo de aproximadamente 10 m³/s.

El sistema de aprovechamiento nace en la torre de toma situada a 250 m del dique, a cota 736 m.s.n.m., desde donde atraviesa la sierra por un túnel de 5 km, y el agua es transportada por dos tuberías de presión que alimentan la central hidroeléctrica Los Molinos I (MI) que posee cuatro turbinas que producen en total 48 MW de potencia.

Luego de ser turbinadas las aguas son vertidas al dique compensador La Quintana, donde se unen nuevamente con las provenientes del embalse Los Molinos (las cuales han sido evacuadas por los descargadores de fondo o por el vertedero). En el dique compensador se ubica la obra de toma para la central hidroeléctrica Los Molinos II (MII) provista de una turbina que genera 4 MW. El propósito del embalse La Quintana es doble, ya que es utilizado para generación de energía eléctrica y riego. A pocos metros aguas abajo de las descargas de la central (MII), se unen las aguas transportadas por el río Los Molinos en el Azud derivador de La Quintana, obra cabecera del canal Los Molinos-Córdoba. Por medio de este azud, cuya obra de toma se encuentra sobre la margen izquierda del río, se deriva agua al canal, la cual es conducida por éste hacia la

ciudad de Córdoba para abastecimiento a la planta potabilizadora Los Molinos (EPEC, 2008).

Para el de monitoreo de un cuerpo de agua se requiere establecer el objetivo de estudio. La selección de sitios (diseño espacial horizontal y vertical) y la frecuencia de muestreo dependen en gran medida de la morfología, hidrodinámica, fuentes de aporte, ya sean puntuales y/o difusas y de los recursos disponibles. Las variables medidas varían según el uso del recurso.

El embalse Los Molinos es un cuerpo de agua multipropósito, que es monitoreado de manera sistemática desde el año 1999 hasta la fecha. A través de los años, el monitoreo se ha rediseñado en función de las problemáticas existentes y de la revalorización de alguno de sus usos. En una primera instancia, con el objetivo de determinar el estado trófico del embalse y cuantificar las distintas fuentes de aporte, se iniciaron monitoreos estacionales de calidad de agua y sedimentos, conducidos por el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (F.C.E.F. y N.) de la Universidad Nacional de Córdoba (U.N.C.) con la participación de la Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (actualmente, Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia).

En el año 2001 se incorporó la empresa Aguas Cordobesas S.A. con el propósito de ampliar las variables medidas, aumentar la frecuencia de monitoreo y realizar un control continuo de la fuente de abastecimiento. En la Figura 2 se observa el mapa de uso de Suelo de la Agencia Córdoba DACyT (2003), donde se destaca el uso agropecuario en todo el perillago del embalse. Por los registros a campo, se observa que a partir del año 2005 se hace notorio el crecimiento de los asentamientos urbanos en la zona del perillago y en las comunas de Los Reartes y Potrero de Garay; con el consecuente cambio en el uso del suelo. En el trabajo final de Molinero Rodríguez (2008) se destaca al embalse por el importante atractivo turístico que representa para sus visitantes, tanto como recurso natural, como por su ubicación privilegiada y el número de actividades recreativas que se realizan.

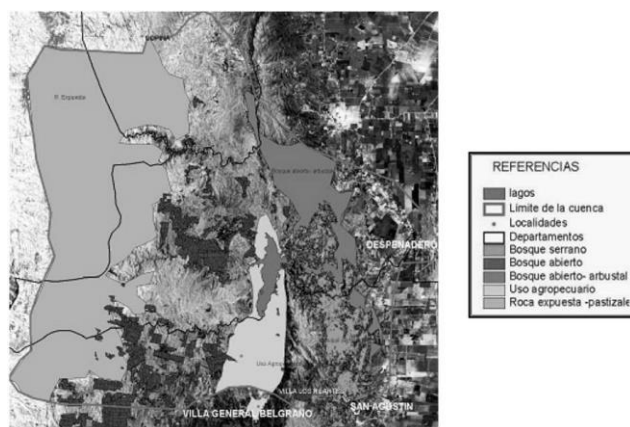


Fig. 2: Mapa de Uso de Suelo de la Cuenca del embalse Los Molinos. Fuente: Agencia Córdoba DACyT, 2003.

A partir de estos antecedentes y al permanente desarrollo de cianobacterias y floraciones tóxicas (que constituye un riesgo para la salud pública) en el año 2010 junto con el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (INA- CIRSA) se decidió realizar monitoreos de calidad de agua para uso recreativo, muestreando las playas y sitios de interés. Adicionalmente, se comenzaron las actividades de relevamiento de campo y de gabinete para la obtención del mapa de cobertura y uso de suelo, realizado junto a la Cátedra Ecología de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Debido a que la calidad del agua del embalse es diferente a la que ingresa a la planta potabilizadora Los Molinos, desde diciembre de 2012 se incorporó en el diseño de muestreo el dique Compensador La Quintana (LQ) y el canal Los Molinos-Córdoba, completándose así el subsistema Xanaes remarcando la importancia de un monitoreo de gestión integrada desde la fuente de abastecimiento hasta la planta potabilizadora. El canal Los Molinos-Córdoba posee 65 km de longitud y en su recorrido atraviesa zonas de cultivos de soja. Lamentablemente, este trasvase no ha podido proporcionar la operatividad, seguridad y eficiencia necesarias para las exigencias del sistema del Gran Córdoba. Desde el año 1993, se registran problemas estructurales debido a que el canal Los Molinos-Córdoba atraviesa suelos loésicos y manifiesta fenómenos de autocolapso Castelló, (2009) y Terzariol (2011). Desde el año 2010 existen denuncias de los vecinos de la zona que manifiestan presencia de agroquímicos en el agua del canal. Esta situación causó la intervención de la Fiscalía de instrucción de Alta Gracia.

Durante los años 2011 y 2012 el canal Los Molinos-Córdoba presentó problemas de olor y sabor generados por la presencia de depósitos de *Oscillatoria sp.*, una cianobacteria productora de metabolitos olorosos. Actualmente, el canal Los Molinos-Córdoba provee entre un 30 a 50 % de la cantidad de agua que puede transportar, debido a las fisuras y pérdidas que presenta.

Recientemente, el gobierno de la provincia ha iniciado un Programa de Rehabilitación Integral del Canal Los Molinos-

Córdoba, lo cual permitirá dar respuestas satisfactorias a la creciente demanda del agua potable y el servicio de riego que beneficia al sector productivo asentado en la zona sur del Gran Córdoba.

El objetivo general del presente trabajo fue:

Dar valor a los monitoreos de calidad de agua como herramienta fundamental para la implementación de medidas de gestión y seguimiento continuo, destacando la importancia de analizar y evaluar la problemática hídrica de manera integral.

Los objetivos específicos fueron:

- Describir la evolución y optimización del diseño de monitoreo según los resultados obtenidos y los usos del cuerpo de agua.
- Mostrar la evolución de la calidad del agua mediante el uso de indicadores de eutroficación, calidad de agua para recreación y cargas de nutrientes por tributarios.

- Evaluar el cambio de uso de suelo en la cuenca del embalse mediante la aplicación de imágenes satelitales.
- Promover la articulación y cooperación interinstitucional y multidisciplinar con el objetivo de mejorar la implementación de los recursos materiales, tecnológicos y humanos.
- Contribuir a la formación de recursos humanos especializados en calidad de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Monitoreo del embalse

En sus orígenes en el diseño de monitoreo adoptado se fijaron seis estaciones de muestreo (DLR: Desembocadura Los Reartes, C: Centro, DLE: Desembocadura Los Espinillos, DSP: Desembocadura San Pedro, P: Presa y T: Toma), teniendo en cuenta las desembocaduras de los ríos, centro, presa y el área de la toma hacia la central hidroeléctrica Los Molinos. El diseño se basó en los usos del cuerpo de agua, en los objetivos de estudio y en las normas internacionales ISO 5667/1 (Guía para el diseño de programas de monitoreo). A partir de 2005, luego de tres años de monitoreo mensual (periodo 2001-2004) y tras la observación y análisis estadístico de los datos se optimizó el diseño de monitoreo. Se eliminó la estación T ya que no se encontraron diferencias significativas con P. Además, se estableció que en las tres desembocaduras de los principales tributarios, las muestras serían compuestas (o integradas en el perfil del agua). En cada estación de monitoreo se realizaron mediciones *in situ*: coordenadas de ubicación geográfica mediante un GPS, temperatura atmosférica empleando un termómetro manual y transparencia del agua utilizando un disco de Secchi. Temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad y turbiedad del agua se midieron utilizando sondas Horiba U-10, U-23 y W-22XD. Las mediciones se realizaron en perfil cada 1 m hasta los 10 m y posteriormente cada 5 m. Para la extracción de muestras de agua en profundidad se utilizaron botellas muestreadoras tipo Van Dorn y Ninsky. Las muestras se obtuvieron a tres profundidades para el periodo de mezcla: Subsuperficial (a 0,20 m del pelo de agua), a la profundidad del disco de Secchi x 2,5 y a 1 m del fondo. Mientras que para el periodo de estratificación térmica se adicionó una profundidad ubicada 1 m por debajo de la termoclina. y la profundidad media se ubicó 1 m por arriba de la termoclina. En laboratorio se determinó la concentración de fósforo total (PT), clorofila-a según Standard Method (APHA, AWWA, WEF, 2012).

Monitoreo de los tributarios

Durante el tiempo en estudio (1999-2013) se realizó el muestreo y aforo de los cuatro tributarios principales con el objetivo de estimar las cargas de aportes de nutrientes. La frecuencia de monitoreo fue mensual entre los años 2001 y 2010 y estacional en los periodos 1999-2000 y 2011-2013. En el periodo comprendido la frecuencia de muestreo fue mensual. Se tomaron muestras instantáneas a nivel subsuperficial en cada uno de los tributarios para análisis de PT por espectrofotometría según Standard Method (APHA, AWWA, WEF, 2012). El aforo del escurrimiento

superficial en el río se realizó con el método por vadeo según la norma ISO 2537. Se utilizó como instrumento de medición de velocidad un molinete hidráulico. Las tareas de campo consistieron en la demarcación y relevamiento de la sección transversal y la medición de la profundidad y la velocidad del flujo medio temporal en cada franja vertical. En gabinete se determinó la velocidad media en cada vertical, las áreas parciales y la integración o sumatoria de los caudales parciales (Bazán, 2006).

Se estimó el aporte de fósforo total mediante la aplicación de FLUX (Walker, 1996) a partir de los datos de concentración de PT de las muestras y el registro de caudales. El aporte desde el perillago se obtuvo mediante cálculos indirectos aplicando coeficientes medios de exportación (c) de PT proveniente de fuentes puntuales y difusas (Tabla 1).

TABLA 1: COEFICIENTES DE EXPORTACIÓN DE PT

Aporte	(c)	Unidades	Referencia
Cloacal directa	0,95	kg.hab ⁻¹ .año ⁻¹	Ryding y Rast (1992)
Animal directa	0,57	kg.per cápita ⁻¹ .año ⁻¹	Rodríguez <i>et al.</i> (2002)
Escorrentía agrícola	0,50	kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Ryding y Rast (1992) Salas y Martino (2001)
Atmósfera	0,43	kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Ryding y Rast (1992)

Monitoreo de las playas

De acuerdo a las actividades realizadas y número de turistas que visitan el cuerpo de agua en época estival se seleccionaron tres playas para su estudio: Bahía el Negro, Solar del Lago y Valle Fantástico, nombradas de sur a norte (Figura 3).

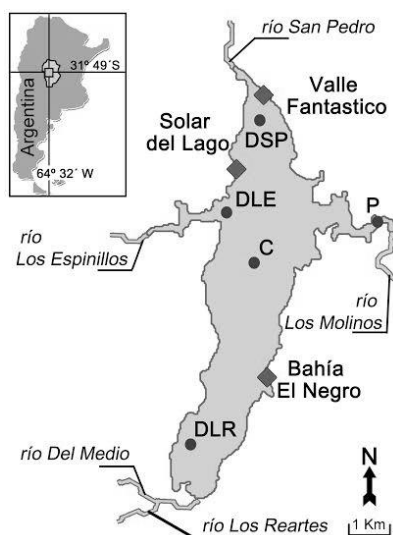


Fig. 3: Sitios de muestreo en el embalse y sus playas.

En estos sitios seleccionados, se tomaron muestras de agua en tres temporadas de primavera-verano durante los años 2010 a 2013 (en los meses de septiembre a marzo). Las muestras de agua se tomaron a una profundidad subsuperficial (0,30 m y 0,50 m) y a una distancia aproximada de 5 m de la costa. Se midieron *in situ*: profundidad máxima, condiciones ambientales, transparencia de disco de Secchi y temperatura del agua mediante sonda Horiba U-10. En laboratorio se realizó recuento de *Escherichia coli* (NMP/100 mL) en caldo EC-MUG e identificación y recuento de algas (cél/mL) según Standards Methods (APHA, AWWA, WEF, 2012). *E. coli* y las cianobacterias fueron determinadas como indicadores de importancia sanitaria, la transparencia como indicador de la estética del recurso y la temperatura del agua como parámetro de agradabilidad.

Monitoreo del dique compensador y canal Los Molinos-Córdoba

Desde diciembre de 2012 se incorporaron en el programa de monitoreo, el azud compensador La Quintana, el canal Los Molinos-Córdoba y el agua de ingreso de la planta potabilizadora. A la fecha se han realizado 6 campañas de muestreo que incluyen mediciones *in situ* y toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio.

En el azud compensador La Quintana debido a su pequeño tamaño y facilidad de acceso, se seleccionó un punto de muestreo a nivel subsuperficial en la zona de la toma que alimenta la segunda central hidroeléctrica MII.

En el canal Los Molinos de 60 km de longitud, se establecieron tres puntos de muestreo (Figura 4).



Fig. 4: Sitios de muestreo en el embalse La Quintana y canal Los Molinos

En la Tabla 2 se detallan los nuevos sitios de monitoreo en el embalse La Quintana y en el canal Los Molinos, sus coordenadas geográficas, progresiva (D) en km (distancia aproximada al inicio del canal) y los análisis de laboratorio realizados según Standard Method (APHA, AWWA, WEF, 2012).

TABLA 2: NUEVOS SITIOS DE MONITOREO

Sitio	Coordenadas	D km	Análisis
La Quintana (LQ)	31° 50' 44.91" S 64° 25' 57.16" O	N/C	Físico- químico PT y PRS, Fitoplancton Clorofila-a Geosmina
Inicio del Canal (Ci)	31° 50' 26.64" S 64° 24' 41.26" O	0	Físico- químico Fitoplancton Glifosato Endosulfan Geosmina
Cruce con ruta C45 (RG)	31° 39' 16.00" S 64° 15' 39.06" O	40	PT y PRS Glifosato; Endosulfan Geosmina
Planta potabilizadora Los Molinos (Rejas)	31° 31' 46.81" S 64° 9' 30.27" O	60	Físico- químico PT y PRS Glifosato; Endosulfan Fitoplancton Geosmina

N/C: no corresponde

Calidad de agua y eutroficación

Para evaluar el proceso de eutroficación se contemplan diferentes estrategias que van desde la inspección visual, aplicación de imágenes satelitales y el uso de parámetros indicadores. Uno de los métodos más sencillos es la aplicación del Índice Trófico de Carlson (ITC) (Carlson, 1977).

Carlson (1977) propuso este índice y actualmente es uno de los más utilizados por su fácil aplicación. Varía entre 0 y 100 es decir, de oligotrófico a hipereutrófico.

Se obtiene a través de la transparencia determinada con el disco de Secchi (DS), por ejemplo, un valor de ITC = 0 corresponde a una profundidad del DS 64 m y cada incremento de 10 m en ITC representa una reducción del 50 %. El mismo índice puede determinarse a partir de otros parámetros, como la concentración de clorofila *a* (Clo-*a*) y fósforo total (PT), cuya relación con la transparencia se ha deducido previamente. Las fórmulas propuestas por Carlson (1977) se observan en las ec. (1 a 3). En el cálculo del índice se consideraron los datos superficiales anuales del sitio de muestreo correspondiente al centro del embalse.

$$ITC(DS) = 60 - 14,41 \ln(DS) \quad (1)$$

$$ITC(Clo - a) = 9,81 - 14,41 \ln(Clo - a) + 30,6 \quad (2)$$

$$ITC(PT) = 14,42 \ln(PT) + 4,15 \quad (3)$$

Mapa de cobertura y uso de suelo

Durante el año 2011, se realizaron relevamientos a campo para obtener un mayor conocimiento de las coberturas que componen la cuenca del embalse Los Molinos. Como base del procesamiento digital, se utilizó una imagen satelital de la zona de estudio (Path: 229; Row: 82) con fecha 21-01-

2011, correspondiente al sensor pasivo Thematic Mapper (TM), transportado por el satélite Landsat 5. Para el análisis, procesamiento e interpretación de la información satelital se utilizó el software ENVI (Versión: 4.2). Se llevaron a cabo tareas de pre-procesamiento en la imagen satelital para reducir o corregir las distorsiones radiométricas y geométricas que se generan al momento de la adquisición de la misma (Sriwongsitanon *et al.*, 2011). Estas correcciones son el primer paso a realizar antes de aplicar cualquier análisis de interpretación (Song *et al.*, 2001), ya que si no se tiene en cuenta el efecto que produce la atmósfera se puede generar una incorrecta interpretación de los resultados. Se transformaron los valores de nivel digital (ND) de los píxeles a valores de radiancia. Mientras que para corregir los efectos atmosféricos se aplicó el modelo de substracción de objetos negros (DOS) (Chavez, 1996).

Para realizar la etapa de georreferenciación, se tomaron 64 puntos de control distribuidos homogéneamente por toda la escena. Se aplicó el método de imagen a imagen (image to image), tomando como imagen base una escena del área de estudio adquirida desde Earth Science Data Interface (ESDI, 2012) la cual ya se encuentra georreferenciada y rectificada con puntos de control. El error medio cuadrado (RMSE) alcanzado fue igual a 0.5 pixel (30 m/pixel); el cual teniendo en cuenta los relieves del terreno y las recomendaciones de Chuvieco (2002), se consideró como aceptable. De acuerdo a la ubicación de la zona de estudio, se transformó la imagen al sistema de referencia Argentino (POSGAR 94) - Zona 4, con datum WGS-84.

Para realizar la clasificación de la cuenca, se enmascaró la zona que no correspondía a la misma y se realizó una clasificación no supervisada (método IsoData). El análisis se complementó con relevamientos a campo y diversos procesos de interpretación. De esta manera, se creó una imagen con once clases o categorías diferentes, lo que permitió la obtención del mapa temático de coberturas y uso del suelo en la cuenca del embalse, pudiendo además generar un inventario de las superficies abarcadas por cada categoría.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estado trófico es un buen indicador del estado de la calidad de un cuerpo de agua léntico. En la Figura 5 se observa la variación anual de los Índices de Carlson. Entre los valores de 40 y 50 se considera un estado de mesotrofia. Por arriba de este valor la condición trófica cambia a eutrofia. Se observa que hasta el año 2007 el embalse Los Molinos presentó un estado mesotrófico con tendencia a la eutrofia. Observándose un máximo de los índice de Carlson de PT durante los años 2003 a 2007.

El diagnóstico del estado trófico se refuerza con los parámetros limnológicos que evidencian agotamiento del oxígeno disuelto hipolimnético y pH ácido durante el periodo de estratificación térmica (Wetzel, 1981). Ambos parámetros son indicadores de la acumulación de materia orgánica en descomposición en el fondo del embalse. Se presentaron conjuntamente con valores bajos de potencial de reducción (≤ 0 mV), aumento de la concentración de Fe total, coloración oscura de los sedimentos anaeróbicos por

formación de FeS (Oroná, 2004; Bazán, 2006). A partir del año 2008 se observa una leve disminución en todos los índices, especialmente en el ITC de Clo-a y DS. Esta tendencia de disminución podría ser consecuencia de la medida implementada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Alimentos que restringió el cultivo de papa en la región. Sin embargo, se resalta que para el índice de Carlson calculado en función del PT, los valores de los dos últimos años (2010 y 2011) se encuentran muy cercanos a 50, denotando un estado de eutrofia.

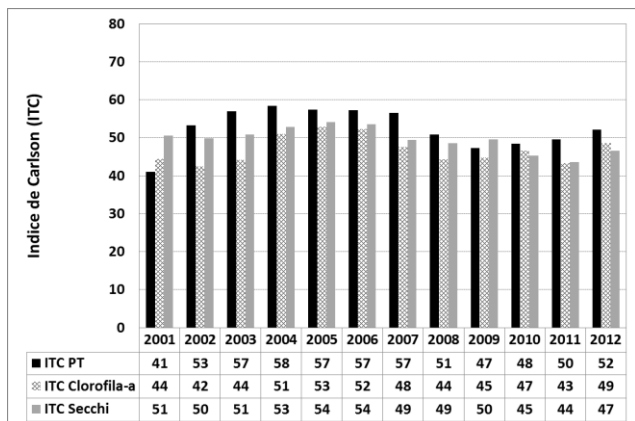


Fig. 5: Variación anual del Índice Trófico de Carlson (ITC)

Como descriptores de la calidad del agua de las playas, se muestran en la Tabla 2 un resumen de los datos de temperatura (Temp), transparencia de disco de Secchi (Secchi) y *E. coli* para cada sitio de monitoreo. La transparencia de disco de Secchi promedio osciló entre 1 y 1,5 m, siendo la mayoría de las veces limitado por la profundidad. Las concentraciones de *E. coli* son variables, tanto espacial como temporalmente. El valor de 800 NMP/100 mL fijado por CoNaMA (1986) como límite satisfactorio, sólo se superó en una campaña en la playa Valle Fantástico. Los géneros predominantes de cianobacterias fueron *Dolichospermum sp.* y *Microcystis sp.*

TABLA 3: RESUMEN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE PLAYAS.

Sitio	Estadístico	Temp °C	Secchi (m)	<i>E. coli</i> NMP/100 mL
Valle Fantástico	Promedio	21,15	1,59	159,65
	Desvío estándar	3,66	0,81	375,24
	Mínimo	15	0,75	1,8
	Máximo	26	3,25	1400
Bahía El Negro	Promedio	21,71	1,16	23,41
	Desvío estándar	3,22	0,43	42,31
	Mínimo	14	0,50	1,80
	Máximo	26	1,90	170
Solar del Lago	Promedio	21,68	1,57	110,34
	Desvío estándar	3,42	0,58	241,19
	Mínimo	15	0,60	1,80
	Máximo	26,1	2,75	790

La carga anual promedio de PT que recibe el embalse Los Molinos es del orden de los 31 tn/año. Dicha carga incluye el aporte de los tributarios, la descarga cloacal directa, descarga animal directa, escorrentía agrícola y deposición atmosférica. Si bien el valor de carga de PT se ha mantenido en el tiempo, la distribución porcentual de la misma ha variado. Se observó un aumento de la descarga cloacal directa, cuadruplicándose su valor, como consecuencia del aumento de la población y ocupación territorial de la cuenca. Actualmente, el aporte por descarga cloacal directa representa el 28 % de la carga total de PT y representa un aporte similar al que ingresa por tributarios, (26 %). La segunda fuente de aporte fue la descarga animal directa (27%) y como fuentes menores de aporte se consideraron la escorrentía agrícola (16 %) y la deposición atmosférica (3 %) (Figura 6).

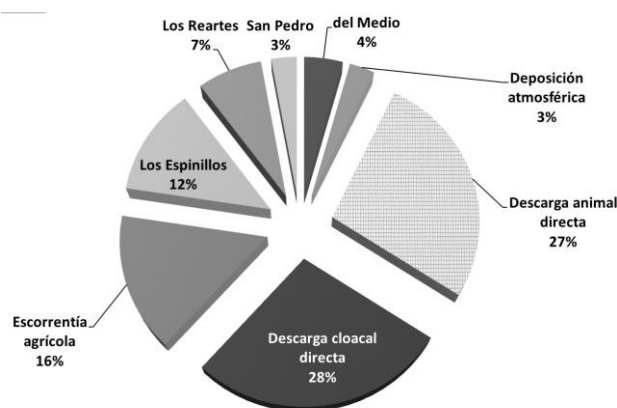


Fig. 6: Distribución porcentual de la carga de PT

A partir de la clasificación de la imagen satelital Landsat 5 TM del área de estudio, se generó el mapa temático de la cuenca del embalse Los Molinos, en la Figura 7 se observan los tipos de cobertura y usos del suelo. La cuenca abarca una superficie de 910,9 km². La misma está compuesta por diferentes categorías o unidades fisonómicas, en donde se observa un predominio de pastizales, que ocupan una superficie de 349,7 km² (35,3%), seguidos por arbustales que abarcan un área de 211,3 km² (23,2%) y roca expuesta (180,66 km²; 18,2%). Las unidades de mayor impacto ambiental, ocupan una superficie de 132,1 km² (14,5%). Estas unidades están compuestas por bosques implantados (7,7%), uso agropecuario (3,6%), uso urbano o poblados (2,7%), rutas y caminos (0,5%).

Al comparar los resultados obtenidos con relevamientos realizados en años previos (Moliner Rodríguez, 2008) se observó un aumento considerable de la categoría uso urbano y en menor medida de las actividades agrícola-ganaderas y la retracción de las regiones boscosas. Las zonas con mayor ocupación corresponden a las comunas de Potrero de Garay y Los Reartes. En este sentido, la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia, clausuró un emprendimiento urbanístico localizado en el perillago. Actualmente, ésta Secretaría se encuentra abocada a elaborar un proyecto de normativas a cumplimentar por los ocupantes del dominio público a fin de establecer las exigencias a cumplimentar para la instalación de kioscos, paradores, camping y

emprendimientos que de alguna manera puedan afectar el recurso. Además, la Ley 9219/05 prohíbe el desmonte total en la provincia por el término de diez años, entiéndase por desmonte total, la eliminación completa de un bosque nativo con la finalidad de afectar esa superficie a actividades que impongan un cambio en el uso del suelo.

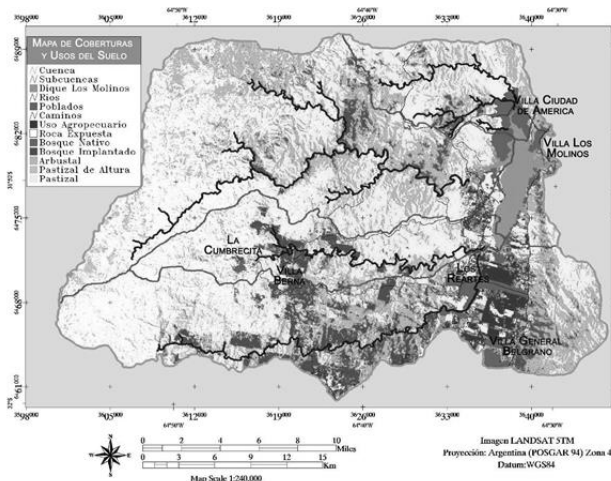


Fig. 7: Mapa de Cobertura y Uso de Suelo de la cuenca del embalse Los Molinos.

CONCLUSIONES

Este estudio a largo plazo, se ha convertido en una herramienta esencial para el seguimiento, control y toma de decisiones para la preservación y gestión del embalse. Se lograron integrar diferentes áreas de investigación: monitoreo, laboratorio, teledetección y gestión relacionados a la problemática de la contaminación y gestión de los recursos hídricos superficiales. El enfoque holístico y multidisciplinar permitió una adecuada racionalización de esfuerzos e interacción del grupo de investigación promoviendo la articulación entre las diferentes instituciones participantes.

El enfoque integral del diseño de monitoreo sentará las bases para la generación de datos confiables, sistemáticos e integrados que permitirán tener una visión global del comportamiento del subsistema Xanaes, sus fortalezas y debilidades.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto los diferentes disturbios que sufre la cuenca. Los cuales han llevado a un alerta sobre el crecimiento de los asentamientos urbanos y el avance de la frontera agrícola sin ningún tipo de control ni planificación, en especial en aquellas zonas ubicadas en el perillago. Estas actividades pueden a futuro favorecer los procesos de eutrofización y deterioro de la calidad del agua del embalse. Se resalta la necesidad de control y gestión del mismo y planificación territorial.

Es importante resaltar que si no se toman medidas de prevención y mitigación de la eutrofización el escenario futuro del embalse Los Molinos, es similar al actual del San Roque (en este momento con un marcado estado de eutrofia y floraciones de cianobacterias frecuentes). Teniendo en

cuenta que el embalse Los Molinos es la segunda fuente de abastecimiento a la ciudad de Córdoba, se recomienda el control de la ocupación territorial en todo el perillago del embalse y zonas críticas como lo son las comunas de Potrero de Garay y Los Reartes.

El programa de monitoreo presentó un espacio propicio para la realización de maestrías, trabajo finales, prácticas profesionales supervisadas y ayudantías de investigación contribuyendo a la formación de profesionales especializados en la problemática del agua de recursos hídricos superficiales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo financiero a proyectos de investigación I&D recibidos por el grupo de investigación durante los años 2008 a 2013, al Laboratorio de Hidráulica de la F.C.E.F y N de la U.N.C. por su participación conjunta y equipamiento para realizar los aforos, al club Bahía El Negro y Bahía Tonon por el apoyo brindado, a los ayudantes de investigación Florencia Origlia, Nicolás Brigante, Santiago Frigerio, Angélica Steinbach, Erick Vogler, Laura Primo y Romina Martínez por su participación activa, al Instituto Superior de Estudios Ambientales (ISEA-UNC) por el espacio físico brindado para actividades de gabinete, al personal técnico de la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación, particularmente a los señores Ricardo Britos, Fernando Monarde, Juan Melian y Gabriel Carnichelli del Área de Preservación y Control del Recurso, a los profesionales del INA-CIRSA que colaboraron, al personal técnico de la empresa Aguas Cordobesas S. A., los señores Claudio Bustos, Franco Ontivero, Marcelo Rodríguez, Juan Rojas, Francisco Tarabini por su participación en los monitoreos.

REFERENCIAS

- [1] Bazán, R. (2006). "Evaluación de la Calidad del agua, nivel de eutrofización y sus consecuencias en el embalse Los Molinos (Córdoba)". Tesis de Maestría en Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba.
- [2] Castelló E., Rodríguez A., Moya G., Bartó C., Chini I. y Menajovsky S. (2000). "Evaluación de alternativas para aprovechamiento del recurso hídrico superficial en el Gran Córdoba, Argentina". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica -Córdoba 2000. Córdoba, Argentina.
- [3] Castelló, E. (2009). "Determinación de la capacidad hidráulica del canal Los Molinos-Córdoba". Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Córdoba.
- [4] CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) (1986). Resolução CONAMA Nº 20
- [5] Chavez, P., 1996. "Image-based atmospheric corrections-revisited and improved". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, 1025-1036.
- [6] Chuvieco, E. 2002. "Teledetección Ambiental". Ed. Ariel S.A., España.
- [7] Carlson, R.E. (1977). "A trophic state index for lakes". *Limnol. Oceanog.* 22:361-369.
- [8] EPEC (2008). "El complejo Los Molinos" Tomado de, <http://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/losmolinos.pdf> (jueves 27 de febrero de 2013).

- [9] INDEC 2010. “Censo Nacional de Población, Hogares y viviendas”. http://www.censo2010.indec.gov.ar/cuadrosDefinitivos/indice_censo_feb12.pdf (martes 27 de marzo de 2012).
- [10] ISO 2537.(1988). “Liquid flow measurement in open channels”.
- [11] ISO 5667/1.(1980). “Water quality - Sampling - part 1: Guidance on the design of sampling programmes”.
- [12] ISO 5667/2. (1991). “Water quality - Sampling - Part 2: Guidance on sampling techniques”.
- [13] Molinero Rodríguez, A. (2008). “Impacto del turismo en la cuenca del embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina”. Trabajo final de carrera, Universidad de Valencia, Campus de Gandía.
- [14] Moya G., *et al.* (2002). Aprovechamiento del recurso hídrico superficial ante la ocurrencia de periodos de sequía en el Gran Córdoba, Argentina. *XIX Congreso Nacional del Agua*. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- [15] OMS, Organización Mundial para la Salud (2004). Guías para la calidad de agua potable.
- [16] Oroná, C. 2004. “Comportamiento de los sedimentos de embalses destinados al suministro de agua potable y su relación con el nutriente fósforo y los procesos de eutrofización”. Tesis de Maestría en Ciencias Químicas. Facultad de Ciencias Químicas, UNC.
- [17] Rodríguez, A., *et al.* (1999). “Análisis de la Cantidad de Agua en el Sistema Suquía-Xanaes” – Primera Etapa, Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- [18] Rodríguez A., Avena M., Rodríguez, Ma. I., Cossavella, A., Oroná, C., Del Olmo, S., Larrosa, N., Bazán, R. y Corral, M. (2002). “Estimación de aportes de nutrientes de fósforo a los embalses San Roque y Los Molinos en Córdoba Argentina e implicancias en su gestión”, *Ing.Sanitaria y Ambiental, AIDIS*, 60: 45-51
- [19] Ruiz M., Rodríguez M., Ruibal Conti, A., Bustamante A, Busso F, Lerda D, Halac S, Nadal F, Olivera P y Sada C (2011). “Aspectos de gestión ambiental y salud en el embalse San Roque (Córdoba)”. *Congreso Nacional del Agua, 2011*, Resistencia, Argentina.
- [20] Ryding, S. y Rast, W. (1992). *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*. Ediciones Pirámide. Madrid, España. 375 pp.
- [21] Salas, H. y Martino, P. (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales*. Versión actualizada, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.
- [22] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition – 2012.
- [23] Song, C., *et al.* (2001). “Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?”. *Remote Sensing of Environment*, 75, 230-244.
- [24] Sriwongsitanon, N., *et al.* (2011). “Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application”. *Journal of Hydrology*, 401, 203-220.
- [25] Terzariol, R. (2011). “Daños en el canal Los Molinos-Córdoba atravesando suelos colapsables de Argentina”. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 12(1) 129.
- [26] Wetzel, R. (1981). *Limnología*, Ediciones Omega S. A., Barcelona, 679 pp.