



Foto: Claudia Simón

MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN INIA LA ESTANZUELA

Dra. María Vallejos^{1,2,3},
MSc. Claudia Simón¹,
MSc. Federico Gallego⁴,
Bach. Julieta Mariotta¹,
Dra. Verónica Ciganda¹

¹Área de Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA, Uruguay

²Departamento de Geografía - Humboldt Universität zu Berlin, Alemania

³Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires, Argentina

⁴Facultad de Ciencias - Universidad de la República, Uruguay

En este artículo se detalla el plan de monitoreo de agua de INIA La Estanzuela y sus principales resultados. La herramienta permite comprender la dinámica de la calidad del agua y aporta elementos para mejorar la gestión de los recursos hídricos y mitigar la aparición de floraciones de cianobacterias.

LA CALIDAD DEL AGUA EN UN CONTEXTO DE INTENSIFICACIÓN AGROPECUARIA

El deterioro de la calidad del agua es un problema creciente en la mayoría de los ecosistemas acuáticos del Uruguay. La ocurrencia de floraciones algales se ha transformado en un fenómeno cada vez más frecuente en lagos, ríos y embalses de todo el país, ocasionando pérdidas económicas y problemas en la salud humana y animal. Asimismo, ha generado una cascada de consecuencias a nivel ambiental.

Los cuerpos de agua continentales son sensibles a su entorno. En este sentido, la eutrofización (enriquecimiento por nutrientes) es el proceso de contaminación más importante, y la ocurrencia de floraciones de microalgas y cianobacterias –principal consecuencia de la eutrofización– se ha transformado en un problema de gran preocupación, tanto dentro del ámbito científico como para la sociedad en general.

Las principales causas de la eutrofización están vinculadas a factores antrópicos, tales como la utilización

y aplicación inadecuada de fertilizantes en los sistemas agropecuarios, el mal manejo de los excrementos animales, o el vertido de efluentes industriales y desechos urbanos. Existen proyecciones que indican que los eventos de floraciones de cianobacterias, en el futuro, serán cada vez más frecuentes e intensos como resultado del cambio climático y la intensificación productiva (Kruk *et al* 2023).

La construcción de embalses artificiales ha sido especialmente promovida a nivel nacional, a través de la Ley de Riego (Ley N°19.553; 2017). Si bien esta Ley exige una autorización ambiental para las construcciones de los embalses, muchos de ellos han sufrido las consecuencias del proceso de eutrofización, lo que no solo impacta en el ambiente, sino que interfiere con los usos y propósitos específicos para los que fueron creados. En este sentido, resulta necesario implementar sistemas de seguimiento para medir la calidad del agua y sus fluctuaciones. La posibilidad de comprender los principales impulsores de este fenómeno permitirá optimizar la gestión de los recursos hídricos y mitigar la aparición de floraciones.

MEDICIONES DE LABORATORIO VS. MEDICIONES ESPECTRALES

Los métodos tradicionales para detectar floraciones de cianobacterias incluyen la recolección de muestras de agua *in situ*, seguido del procesamiento en laboratorio donde se realiza la identificación microscópica y recuento de células, colonias o filamentos, además de la estimación de pigmentos tales como la Clorofila o Ficocianina mediante colorimetría. Estos métodos proveen una evaluación precisa del componente biológico del sistema acuático y complementan fuertemente a las mediciones de las características físicas y químicas. Sin embargo, dichos métodos envuelven altos costos de recursos y tiempo, y por lo general, no ofrecen una representación de la magnitud de la floración, su heterogeneidad espacial, ni una evolución temporal con alta frecuencia.

El uso de la teledetección ha ido en aumento como una herramienta útil para proporcionar una cobertura geográfica completa y sinóptica de la calidad del agua en los sistemas de agua dulce y complementar las iniciativas de monitoreo tradicionales. Las aguas costeras, estuarinas y continentales son ópticamente más complejas que las aguas oceánicas debido a la presencia de materia orgánica disuelta y los sólidos en suspensión, lo que dificulta su medición mediante sensores remotos. La Clorofila-a ha sido el indicador más utilizado en programas de monitoreo como indicador de la biomasa de fitoplancton, ya que es robusto, relativamente sencillo de estimar y existen numerosas plataformas con la resolución espectral adecuada para su medición.

Para un monitoreo preciso y cuantitativo de las floraciones de cianobacterias, es necesario realizar mediciones de campo y calibrar los algoritmos para las condiciones locales. Los espectro-radiómetros de campo se usan para medir la reflectancia de la superficie del agua. Esta información, a su vez, es utilizada para vincular los datos espectrales (llamados comúnmente “firma radiométrica”) con alguna de las variables medidas en laboratorio (e.g., números de células de cianobacterias). Aunque los índices desarrollados en otros estudios pueden ser un buen enfoque inicial para monitorear las floraciones de cianobacterias en nuevos entornos, existe la necesidad de obtener datos locales para desarrollar algoritmos que reflejen las propiedades ópticas según características puntuales. En este sentido, la obtención de datos de campo locales es una entrada central para calibrar los datos espectrales con los datos de campo, y utilizar esta información para la medición con sensores remotos.

EL ESTABLECIMIENTO DE UN PLAN DE MONITOREO EN INIA LA ESTANZUELA

En la Estación Experimental Dr. Alberto Boerger (INIA La Estanzuela), en el Departamento de Colonia se localizan dos embalses artificiales, que fueron creados como reservorios de agua para riego. El Lago Chico comenzó a funcionar en la década del 60, y el Lago Grande, construido en 2013, comenzó a funcionar en 2015.

En 2019, a raíz de cuestionamientos sobre la calidad del agua en el arroyo efluente del Lago Grande de INIA La Estanzuela, se diseñó un esquema de monitoreo de la calidad de agua en la cuenca del arroyo “El General”. El plan de monitoreo fue implementado en octubre de ese mismo año, con los siguientes objetivos:

- 1 - Comprender la dinámica intra e interanual de este sistema acuático;
- 2 - Evaluar la influencia de la creación del embalse Lago Grande en su arroyo efluente;
- 3 - Analizar la relación entre las distintas variables vinculadas a la calidad del agua;
- 4 - Estudiar cuáles son los principales impulsores del aumento en las floraciones;

En 2019, a raíz de cuestionamientos sobre la calidad del agua en el arroyo efluente del Lago Grande de INIA La Estanzuela, se diseñó un esquema de monitoreo de la calidad de agua en la cuenca del arroyo “El General”.

5 - Calibrar los índices espectrales medidos a campo con las variables medidas en laboratorio;

6 - Elaborar medidas de mitigación de daños y remediación de los sistemas para reducir el impacto que pueda estar sumando la estación experimental en el curso de agua.

El plan de monitoreo tiene una frecuencia mensual, con doce puntos de muestreo (Figura 1). Uno de los puntos se encuentra aguas arriba del predio de INIA La Estanzuela, a la salida del pueblo MEVIR, dos puntos están aguas abajo del predio, y los puntos restantes se encuentran dentro del predio. En cada muestreo se toman las medidas de una serie de variables relacionadas a la calidad del agua (Cuadro 1), que son recopiladas y analizadas posteriormente.



Figura 1 - Puntos de muestreo del monitoreo que se analizan mensualmente en la cuenca del arroyo "El General", Departamento de Colonia.

Cuadro 1 - Variables medidas en los muestreos.

Variable	Medición	Instrumento / método	Descripción
Oxígeno disuelto	<i>In situ</i>	Analizador multiparamétrico de agua	Es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua y resulta fundamental para la vida de los organismos acuáticos.
pH			Es una medida de la acidez o alcalinidad del agua y tiene una gran influencia en muchos procesos biológicos.
Temperatura			La temperatura regula los procesos físicos, químicos y biológicos en el agua. Las cianobacterias son sensibles a los cambios de temperatura del agua y requieren que la misma se mantenga en un intervalo determinado para poder sobrevivir y reproducirse.
Conductividad eléctrica			Es una medida de la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica y aumenta con la concentración iónica, por lo que se utiliza para estimar la mineralización global del agua.
Turbidez			Turbidímetro portátil
Datos espectrales		Sensor hiper-espectral	Miden la reflectancia del agua en distintas porciones del espectro electromagnético. Esto permite generar –o validar– índices espectrales que estimen parámetros físico-químicos vinculados a la calidad de agua.
Sólidos disueltos y en suspensión	Laboratorio de Suelos INIA LE	Método APHA 1995	Es una medida de las sustancias disueltas (menores a 0.45 µm) así como material particulado en suspensión (se compone de una parte orgánica viva y una fracción detrítica orgánica e inorgánica) del agua.
Fósforo reactivo y total		Método APHA 2012 - 4500 PD	La concentración de fósforo total mide la cantidad de fósforo disponible en forma orgánica e inorgánica, disuelta y particulada en los sistemas acuáticos. El fósforo constituye el nutriente limitante de la producción primaria.
Nitrógeno total		Método Kjeldahl con evaporación previa	El nitrógeno es otro componente esencial de los seres vivos, que forma parte de las proteínas y el ADN. La presencia excesiva de N en el agua genera un ambiente propicio para la proliferación de floraciones de cianobacterias y algas.
Clorofila y Ficocianina	LATU	Cromatografía de pigmentos	La Clorofila-a (Chl-a) es un pigmento esencial para la fotosíntesis, que se encuentra en plantas, algas y cianobacterias. Las características de reflectancia de la Chl-a se han utilizado para desarrollar una variedad de algoritmos que permiten mapear su presencia en aguas turbias. La Ficocianina es un pigmento asociado a la toxicidad de las células cianobacterianas, por lo que resulta más adecuada que la Chl-a para detectar floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas.
Concentración e identificación de cianobacterias y cianotoxinas		Metodología Utermöhl (1958)	Se monitorean para saber la concentración y tipos de cianobacterias presentes. Estas dos características sirven para determinar el potencial de nocividad del agua para consumo humano y animal, o de otras actividades que se puedan realizar en los cuerpos de agua.

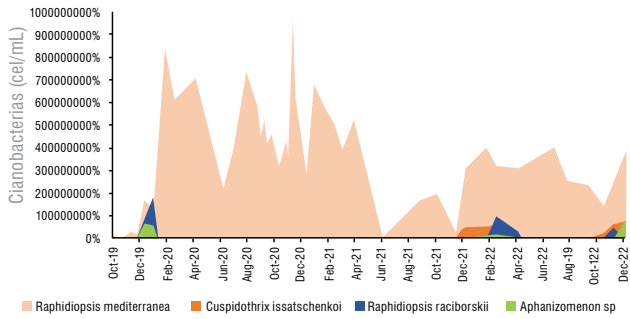


Figura 2 - Densidad de los cuatro grupos taxonómicos principales de cianobacterias que ocurren en el Lago Grande a lo largo del tiempo.

RESULTADOS PRELIMINARES

La cianobacteria más abundante fue *Raphidiopsis mediterranea* (Figura 2), una cianobacteria filamentosa de agua dulce muy común en embalses pequeños, que forma floraciones tóxicas en cuerpos de agua eutróficos. Estas cianobacterias producen estructuras de resistencia que les permite sobrevivir ante condiciones ambientales desfavorables.

La temperatura del agua, la luz y las concentraciones de fosfato son factores determinantes importantes para la sucesión estacional de esta especie. Debido a su capacidad para producir cianotoxinas potentes, como la cilindrospermopsina y la anatoxina-a, se considera un riesgo potencial para la salud humana y animal.

La segunda especie en frecuencia de aparición fue *Cuspidothrix issatschenko*, la tercera *Aphanizomenon* sp y cuarta *Raphidiopsis raciborskii*. Esta última se ha registrado en la región y es capaz de producir toxinas que interfieren en la comunicación nerviosa (saxitoxina, anatoxina-a) y tener efectos sobre hígado y riñón (cilindrospermopsina).

En ambos lagos, para la mayoría de los muestreos, los valores superan lo establecido como límite máximo de riesgo moderado por exposición recreativa (100.000 cel/mL), por lo que se deben restringir las actividades en este tipo de cuerpos de agua de acuerdo con la OMS (Chorus & Bartman, 1999).

Se relacionaron los valores de Clorofila-a medida en laboratorio con una serie de índices espectrales obtenidos de las mediciones a campo mediante un Sensor Hiperespectral. El índice con el que se obtuvo una mejor correlación fue el "Índice Normalizado de tres Bandas" (Drodz *et al.* 2019), utilizando las bandas coincidentes con las del sensor MSI

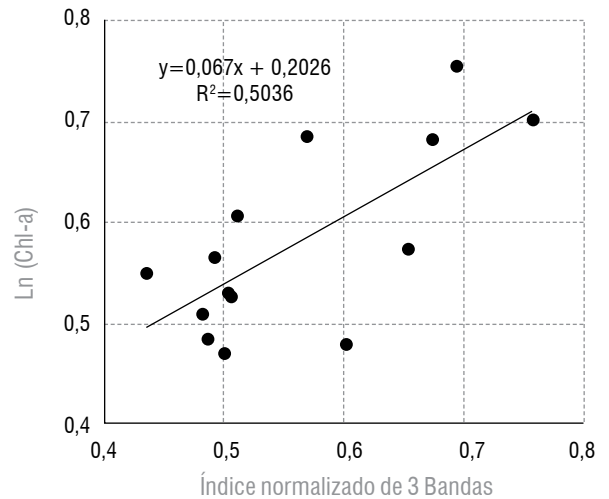


Figura 3 - Relación entre Chl-a medida en laboratorio y Diferencia Normalizada de 3 Bandas obtenido con el sensor hiperespectral.

de Sentinel 2 $[(\lambda 560 - \lambda 660 + \lambda 703) / (\lambda 560 + \lambda 660 + \lambda 703)]$ (Figura 3). Mediante esta ecuación, se mapeó la serie temporal de concentración de clorofila en el Lago Grande y el Chico, utilizando los datos de Sentinel 2 (Figura 4).

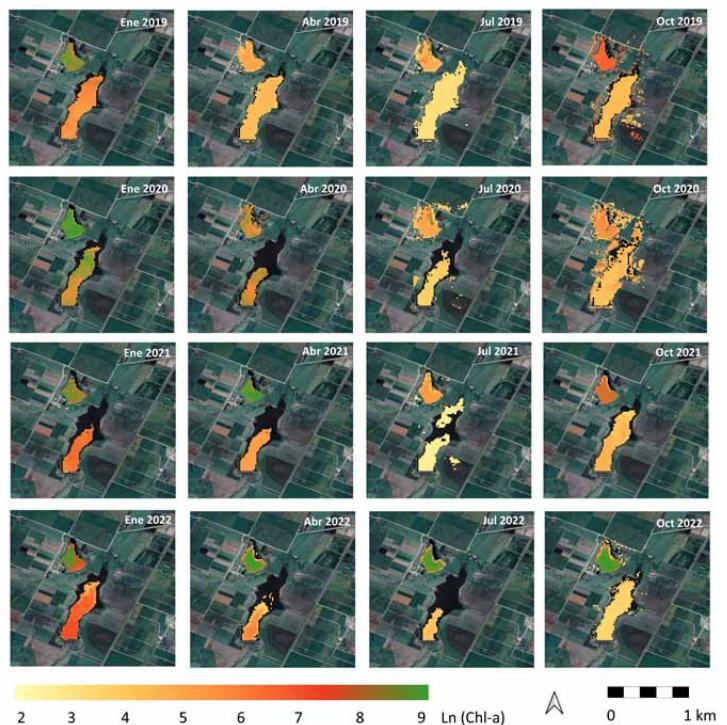


Figura 4 - Concentración de Clorofila-a, expresada como Ln (Chl-a), obtenida mediante el índice "Diferencia Normalizada de 3 Bandas" de Imágenes Sentinel 2 (20 m resolución espacial). Se muestran 16 imágenes entre los años 2019 y 2022. Los valores representan el promedio de cada mes.

La temperatura del agua, la luz y las concentraciones de fosfato determinan la sucesión estacional de *Raphidiopsis mediterránea*, cianobacteria más abundante en este monitoreo.

MEDIDAS DE MITIGACIÓN PROPUESTAS Y SU IMPLEMENTACIÓN

Mediante el análisis de los datos del monitoreo y discusiones grupales con miembros del equipo de investigadores de INIA, se elaboró un plan de acción para remediar la calidad del agua en el Lago Grande. La rehabilitación de cuerpos de agua eutrofizados es un proceso muy complejo y costoso, entre otras cosas, porque el proceso presenta una lógica acumulativa y resiliente.

Incluso en los casos en que se ha logrado un descenso de los niveles de nutrientes en el agua hasta los niveles anteriores a la ocurrencia de síntomas notorios de eutroficación, la problemática suele persistir debido a la carga interna de nutrientes en los sistemas, los cambios ocurridos en la trama trófica y a que las cianobacterias generan condiciones que facilitan su perpetuación.

Una acción de mitigación ya instalada fue la colocación de pastores (cercos eléctricos móviles) en los predios a los que ingresa el ganado por los que pasan arroyos que desembocan en el lago, para evitar el ingreso directo de los nutrientes de heces y orina en los cursos de agua. Entre las medidas de mitigación propuestas, se diseñó un sistema de humedales en las entradas del lago que provienen del tambo de La Estanzuela. También se propuso un manejo agronómico con control del uso de nutrientes mediante la aplicación de mejores prácticas de manejo, y se sugirió disminuir el tiempo de residencia del agua ya que el impacto de una carga alta de nutrientes es mayor cuando el tiempo de residencia es mayor. Además, se propuso la colocación de macrófitas (plantas acuáticas), preferentemente enraizadas y sumergidas que compitan por los nutrientes con las cianobacterias y les tapen la luz.

REFERENCIAS

Chorus, I. and Bartram, J. (1999). Toxic Cyanobacteria in Water - A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management. Routledge, London and New York.

Drozd, A.P., de Tezanos Pinto, P., Fernández, V., ... & Ibañez, G. (2019). Hyperspectral remote sensing monitoring of cyanobacteria blooms in a large South American reservoir: high- and medium-spatial resolution satellite algorithm simulation. Marine and Freshwater Research.

Kruk, C., Segura, A., Piñeiro, G., Baldassini, P., ... & Piccini, C. (2023). Rise of toxic cyanobacterial blooms is promoted by agricultural intensification in the basin of a large subtropical river of South America. Global Change Biology.



Foto: María Vallejos

Figura 5 - Toma de muestras para nutrientes, cianobacterias, clorofila y ficocianina en Lago Grande. Las muestras para cianobacterias se fijan con lugol y las muestras para pigmentos se envían en botellas color ámbar para reducir su degradación con la luz. Ambas se envían refrigeradas al LATU para ser procesadas dentro de las siguientes 24 horas.