

Diatomeas. Lámina 84 de la obra de Ernst Haeckel *Kunstformen der Natur* ('Formas artísticas de la naturaleza'), litografía de Adolf Giltisch, Instituto Bibliográfico, Leipzig y Viena, 1904.

Irina Izaguirre, Inés O'Farrell, María Laura Sánchez
Instituto de Ecología Genética y Evolución de Buenos Aires (IEGEB), UBA-Conicet

¿De qué nos habla el fitoplancton?

Un universo microscópico en el agua

Los lagos, las lagunas, los ríos y los mares constituyen indudablemente elementos atractivos en los paisajes; invitan a la práctica de deportes, a la recreación, a la meditación y la relajación. Aun en medio de las ciudades, los lagos resultan sitios recreativos por excelencia, visitados por miles de personas. Sin embargo, el microuniverso vivo que se esconde en el agua de estos ambientes permanece prácticamente desconocido para la mayor parte de los seres humanos. Pocos saben, por ejemplo, que el color verde de cualquiera de los lagos de Palermo, en Buenos Aires, se debe a que en el agua viven miles de millones de microalgas que conforman una comunidad llamada *fitoplancton*. Una sola gota observada al microscopio con una lente que permita su aumento en unas 400 veces revela un universo integrado por una enorme diversidad de diminutos organismos verdes que componen el fitoplancton, con formas sumamente variadas: esféricas, estrelladas, cilíndricas, ovaladas, con

espinas, con estrías, con envoltorios transparentes y un sinnúmero de morfologías más, como se aprecia en la microfotografía de diatomeas.

Una pequeña muestra de agua de cualquier laguna puede albergar cientos de especies diferentes de fitoplancton, cada una con sus particularidades, sus ciclos de vida y sus requerimientos ecológicos. Algunas tienen mecanismos para evadir ser ingeridas por los minúsculos animales que conforman el zooplancton, o para evitar hundirse en la columna de agua y perder acceso a suficiente luz para el proceso de fotosíntesis, mediante el cual se alimentan. Si las condiciones de luz o de nutrientes inorgánicos no son adecuadas para realizar la fotosíntesis, algunas microalgas, conocidas como mixótrofas, pueden incluso, para subsistir, combinar la fotosíntesis (por la cual producen su propio alimento, lo que se llama *autotrofia*) con la ingestión de bacterias (que es alimentarse de otros organismos o *heterotrofia*). En este artículo nos proponemos acercar al lector algunas de las facetas más interesantes sobre esta fascinante comunidad microscópica y enfocar también en su rol de centinela de cambios ambientales.

¿DE QUÉ SE TRATA?

Un universo microscópico en cuerpos de agua dulce, entre ellos las lagunas pampeanas.

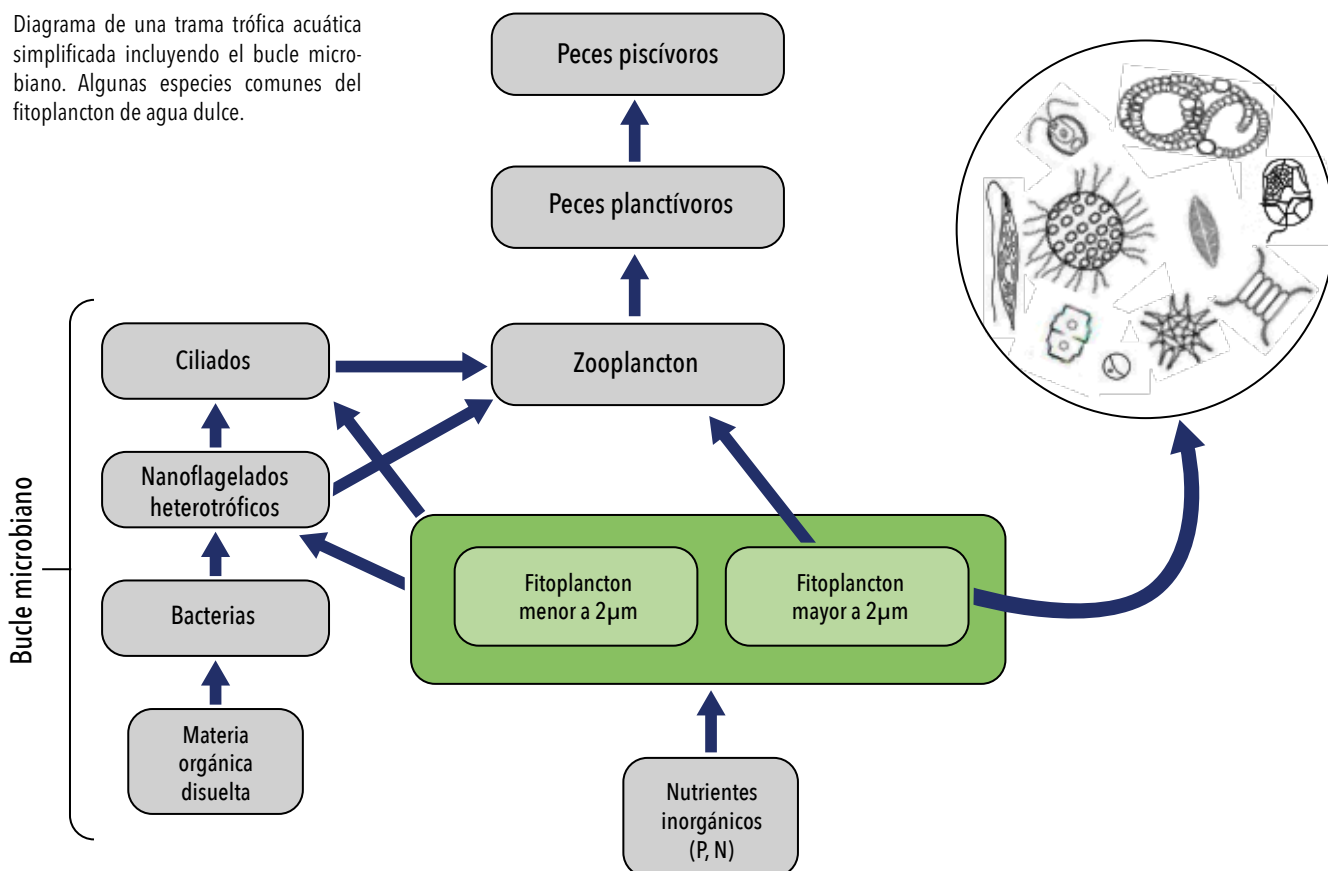
Mucho más que bellas miniaturas

La belleza de las especies del fitoplancton solo puede ser apreciada a través de la lente de un microscopio. En este sentido, las microalgas fueron una de las fuentes de inspiración para el naturalista alemán Ernst Haeckel (1834-1919), cuyos bocetos dieron lugar a una de las más bellas obras sobre el mundo natural publicadas en el siglo XIX. Pero el fitoplancton es mucho más que una comunidad de pequeñísimos seres bonitos; su rol ecológico es absolutamente fundamental para nuestro planeta. Por un lado, en la mayoría de los ecosistemas acuáticos el fitoplancton constituye la base de toda la trama alimentaria, pues permite el desarrollo de los niveles tróficos superiores, incluyendo a los peces. Además, la fotosíntesis realizada por el fitoplancton es una de fuentes principales de oxigenación de las aguas. Por otro lado, en el nivel global, el fitoplancton marino es responsable de producir alrededor del 50% del oxígeno que respiramos y de absorber una parte muy importante del dióxido de carbono que genera el ser humano. Es, por lo tanto, de vital importancia en el presente contexto de cambio global. Además, el fitoplancton es un excelente centinela de los cambios que tienen lugar en el ambiente y brinda valiosa información sobre la calidad del agua, tema en el cual nos enfocaremos particularmente más adelante.

Cambios estacionales del fitoplancton

El fitoplancton generalmente experimenta cambios durante el año que están asociados con la variación en el cuerpo de agua de diversos factores, tanto físicos (luz, temperatura) o químicos (concentración de nutrientes) como biológicos (predadores). Esas variaciones estacionales pueden implicar desde modificaciones en la abundancia de las distintas especies hasta reemplazos de unas especies por otras. En las regiones templadas o polares las variaciones estacionales pueden llegar a ser de una magnitud mil veces mayor que en regiones tropicales, donde la temperatura y la intensidad de luz son relativamente constantes a lo largo del año. Por ejemplo, en un lago ubicado en la península antártica, a partir de su descongelamiento a comienzos del verano, algunas especies comienzan a multiplicarse rápidamente y durante los dos o tres meses que el cuerpo de agua permanece descongelado tienen lugar un rápido crecimiento y fluctuaciones en la comunidad del fitoplancton. Los cambios estacionales son generalmente cíclicos; típicamente la mayor abundancia de fitoplancton en lagos de latitudes medias suele ocurrir en la época más cálida (primavera y verano), mientras en invierno la biomasa de esos orga-

Diagrama de una trama trófica acuática simplificada incluyendo el bucle microbiano. Algunas especies comunes del fitoplancton de agua dulce.





Arriba. Muestra de fitoplancton de una laguna pampeana observada con 400 aumentos. La barra que da la escala mide 10 micrones. **Derecha.** Laguna pampeana.



nismos se reduce notablemente. La estacionalidad también puede estar vinculada con los cambios del régimen de lluvias, sobre todo en zonas tropicales. En lagunas sometidas a pulsos de inundación, como las ubicadas en llanuras aluviales de ríos, los cambios temporales en la comunidad de fitoplancton están más o menos acoplados al régimen hidrológico.

Cambios en el largo plazo

Si aumentamos la escala temporal de análisis, la estructura del fitoplancton puede ir modificándose con el transcurso del tiempo, por ejemplo, debido a las actividades humanas o a cambios climáticos. Para poder apreciar tales cambios es necesario estudiar el ambiente durante mu-

chos años. Por ejemplo, estudios de largo plazo sobre el fitoplancton de lagos del hemisferio norte evidenciaron, conforme iba bajando el pH del agua, el efecto acumulativo de las lluvias ácidas en algunos de los lagos ubicados en las zonas más industrializadas.

Por otra parte, el análisis de los sedimentos que se van depositando en un lago permite dilucidar modificaciones del fitoplancton asociadas con actividades humanas o con cambios en las condiciones climáticas y geológicas. Por ejemplo, estudios de pigmentos fotosintéticos del fitoplancton en sedimentos de la laguna La Barrancosa, ubicada en el partido bonaerense de Benito Juárez, realizados por María Sofía Plastani y sus colaboradores, evidenciaron que a partir de la década de 1990 se aceleró la eutrofización de ese cuerpo de agua, es decir, se incrementó en él la concentración de nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno) y aumentó la biomasa de algas.

Otra forma de evaluar cambios de largo plazo es recurrir a técnicas de teledetección con sensores remotos. Así, a partir de una investigación realizada en lagos sudamericanos dirigida por Sarian Kosten, de la universidad holandesa de Radboud, en Nijmegen, publicada en la revista *Freshwater Biology*, comparando imágenes satelitales de 1987 y 2005, se infirió que tuvo lugar una disminución de la transparencia del agua en lagunas pampeanas asociada con un incremento de la biomasa de fitoplancton. Más del 50% de lagunas que eran claras en 1987 se mostraban turbias en 2005, posiblemente a causa del cambio del uso de la tierra en ese período.

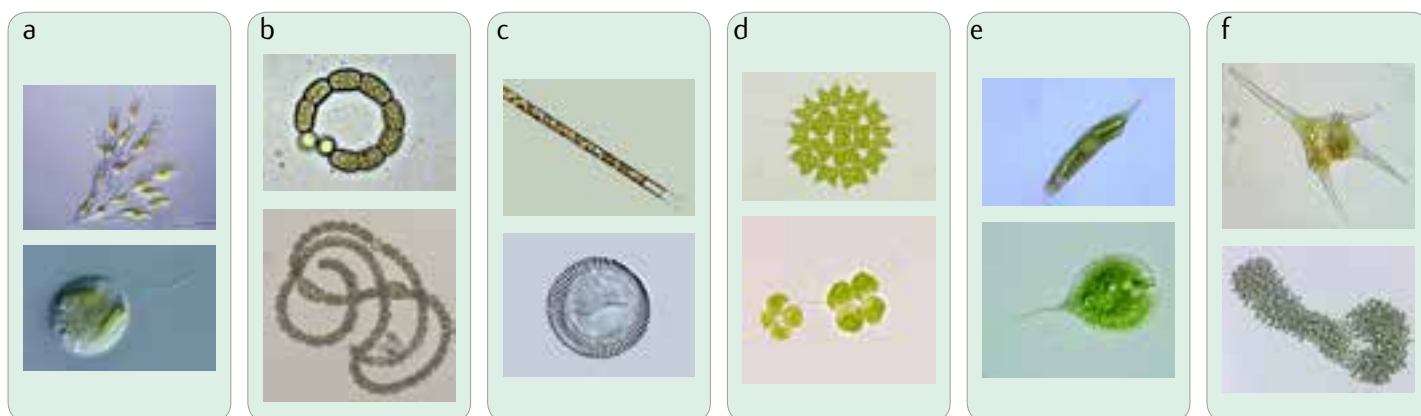
La habilidad de las diferentes especies del fitoplancton para ser exitosas en un cuerpo de agua en un momento determinado depende de sus requerimientos ecológicos. Para caracterizar las principales formas de adaptación al ambiente de esa comunidad de fitoplancton, el fitoplanctólogo británico Colin Reynolds (1942-2018) adaptó una clasificación elaborada para plantas te-

rrestres por su compatriota John Philip Grime, profesor emérito de la Universidad de Sheffield: el esquema CSR. En el caso del fitoplancton, las especies C (colonizadoras) son más pequeñas, se reproducen rápido y tienen éxito en ambientes en que los recursos no son limitantes (buenas condiciones de luz y abundancia de nutrientes), las especies S (resistentes al estrés) son generalmente más grandes, tienen una tasa de crecimiento más baja y suelen estar adaptadas a la escasez de recursos (algunas almacenan sustancias de reserva o fijan N) y las especies R (ruderales) presentan una gran adaptabilidad a vivir en ambientes con disturbios frecuentes, como mezclas continuas de la columna de agua.

Por otro lado, las especies del fitoplancton pueden presentar diversos rasgos funcionales, tanto morfológicos (tamaño, forma) como fisiológicos (adaptaciones a distintas condiciones de luz, fijación de nitrógeno). En este sentido, actualmente está muy difundido el uso de la diversidad funcional para clasificar las especies y establecer grupos funcionales que reúnen aquellas con rasgos similares, por lo común asociados con determinadas condiciones ambientales. El estudio de la diversidad funcional del fitoplancton se ha extendido ampliamente en los últimos años, porque permite analizar la comunidad de esos organismos sin necesidad de contar con gran experiencia en la identificación taxonómica. Analizar la diversidad funcional permite monitorear un ambiente acuático y evaluar si la calidad del agua se está deteriorando. En este sentido es una herramienta muy potente que puede ser usada por organismos de gestión ambiental. Si un cuerpo de agua se ve afectado por las actividades antrópicas que tienen lugar en la región —supongamos un aumento en el ingreso de nutrientes debido a la expansión de la agricultura—, el fitoplancton constituye un valioso centinela que registra ese cambio ambiental, pues su respuesta puede ser un cambio en los grupos funcionales, o en ciertas especies clave.

Adaptación al ambiente	C	S	R
Principales características ecológicas de las especies	Pequeño tamaño, rápida multiplicación, lento hundimiento en la columna de agua, muy susceptibles al ataque de zooplancton, invasoras oportunistas	Tamaño más grande (con frecuencia multicelulares), lenta multiplicación, poco susceptibles al ataque de zooplancton, resistentes a situaciones de escasez de nutrientes	Tamaño y morfología variables, en su mayoría no móviles, resistentes a los disturbios ambientales
Condiciones ambientales en que tienen más éxito	Abundancia de nutrientes y de luz	Escasez de nutrientes	Ambientes con frecuentes disturbios

Características principales de las formas primarias de adaptación al ambiente del fitoplancton, según el esquema de Colin Reynolds explicado en el texto.



Ejemplos de algunos géneros incluidos en distintos grupos funcionales fitoplanctónicos (de acuerdo a la clasificación de Reynolds), presentes en ambientes acuáticos con diferentes características. a: *Dinobryon* (grupo E) y *Ochromonas* (grupo X3), crisofitas mixotróficas típicas en lagos oligotróficos; b: *Anabaenopsis* y *Dolichospermum* (grupo S_N), cianobacterias que pueden fijar N y formar floraciones en ambientes eutróficos; c) *Aulacoseira* (grupo P) y *Cyclotella* (grupo C), diatomeas céntricas típicas en cuerpos de agua muy mezclados, tales como ríos; d) *Pediastrum* y *Tetrastrum* (grupo J), algas verdes del grupo de las clorococales frecuentes ambientes eutróficos; e) *Euglena* y *Phacus* (grupo W1), euglenofitas frecuentes en ambientes con mucha materia orgánica, incluyendo cuerpos de agua contaminados; f) *Ceratium* y *Microcystis* (grupo L_m), suelen co-ocurrir en lagos eutróficos a hiper-eutróficos, principalmente en algunos embalses.

El fitoplancton responde rápidamente a las principales amenazas

En los cuerpos de agua continentales de la Argentina algunas de las principales amenazas para la integridad ecológica son la eutrofización, la contaminación de distinto tipo, la introducción de especies y el cambio climático.

La eutrofización lleva al incremento en la biomasa fitoplanctónica y, en su etapa avanzada, a la proliferación de algunas especies en forma de floraciones que pueden llegar a ser nocivas. Esta problemática afecta a gran parte de las lagunas pampeanas argentinas, por causas relacionadas con cambios del uso de la tierra (expansión de la agricultura, ganadería, urbanizaciones, canalizaciones, etcétera), y es también frecuente en muchos embalses.

La contaminación, principalmente la de origen industrial y la orgánica por desechos domiciliarios no tratados, afecta fuertemente a los cursos de agua ubicados en los alrededores de los grandes centros urbanos, por ejemplo, la cuenca Matanza-Riachuelo. El fitoplancton de estos ambientes muestra signos evidentes de cambio, con incrementos de especies tolerantes a la contaminación —como ciertas diatomeas o los euglenoideos— e incluso la presencia de formas anormales o teratológicas de algunas especies.

El efecto de la introducción de especies sobre el fitoplancton se ha visto claramente plasmado en lagos de la meseta patagónica que naturalmente carecen de peces. En algunos localizados en campos privados, se han introducido truchas con propósitos deportivo-comerciales, lo

que ha generado alteraciones de la red trófica acuática, entre ellas cambios en los grupos funcionales fitoplanctónicos y aumento de la biomasa algal.

El cambio climático también puede afectar fuertemente a los cuerpos de agua y, por consiguiente, al fitoplancton. Por ejemplo, una gran sequía puede provocar un drástico descenso en el nivel de un lago, como los que se han visto en lagunas de la meseta patagónica y de la región pampeana, y han llevado a la muerte de plantas acuáticas sumergidas y a un consiguiente aumento en la biomasa del fitoplancton.

Un ejemplo de monitoreo de largo plazo: el proyecto PAMPA 2

El proyecto PAMPA 2 (Proyecto Argentino de Monitoreo y Prospección de Ambientes Acuáticos), financiado por el Conicet, reúne a diferentes grupos de investigación de la Argentina dependientes de dicho organismo y de universidades nacionales cuyas temáticas de estudio están vinculadas a lagunas de la región pampeana. Uno de sus objetivos principales es analizar los cambios asociados con la actividad antrópica y con la variabilidad climática que tienen lugar en las lagunas. El proyecto incluye el monitoreo de un conjunto de lagunas ubicadas en la región a lo largo de un gradiente de temperatura y humedad. En algunas se llevan a cabo muestreos continuos de alta frecuencia mediante boyas de medición automática que permiten el registro de variables de interés, mientras que otras se monitorean mensualmente y se analizan variables limnológicas y de las comunidades planctónicas

(incluyendo al fitoplancton). Estos estudios están mostrando diferencias en la estructura del fitoplancton entre cuerpos de agua localizados en distintas zonas del gradiente climático analizado, y también entre aquellos que están sometidos a diferente grado de consecuencias de la acción humana. En general, la mayoría de las lagunas de la región se caracterizan por ser eutróficas y por su alta biomasa de fitoplancton. En algunas se registran floraciones algales recurrentes en el período cálido, y en mu-

chos casos se está observando que estas se extienden al período otoñal. Este tipo de monitoreo, que se extiende por varios años consecutivos, es imprescindible para poder evaluar cambios de largo plazo en la comunidad fitoplanctónica.

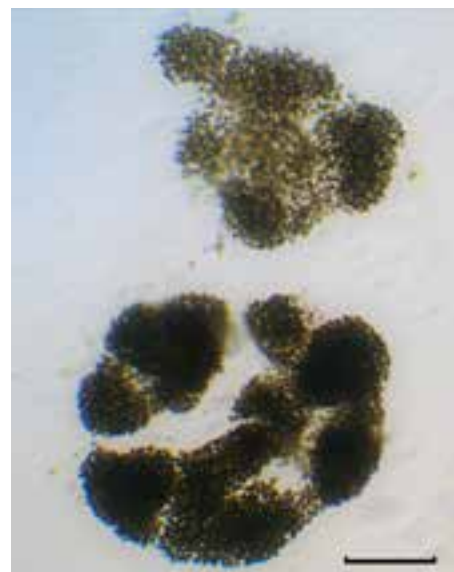
Cianobacterias: un grupo muy exitoso

Las cianobacterias estuvieron entre los primeros organismos que poblaron la Tierra. El oxígeno liberado en la atmósfera por su fotosíntesis habría sido el precursor de la capa de ozono. Han colonizado casi todos los ambientes acuáticos del planeta. Son varias las características ecofisiológicas que les conceden una gran aptitud ecológica: su capacidad de fijar nitrógeno, de regular la flotabilidad y de almacenar fósforo, sus óptimas tasas de crecimiento a altas temperaturas, su captura de luz en un amplio rango de longitudes de onda, su gran supervivencia en tiempos de condiciones adversas. A medida que cambian los recursos limitantes en el ambiente, uno o más de estos rasgos colocan a las cianobacterias en posición muy competitiva.

La proliferación de las floraciones de cianobacterias tóxicas constituye una amenaza creciente para las aguas dulces de todo el mundo, ya que estas reducen la biomasa y la diversidad de la vegetación sumergida y alteran la dinámica de la red trófica. Las condiciones de bajo oxígeno causadas por el colapso y la degradación de las floraciones pueden desencadenar la muerte de los peces. Los animales

Laguna	Cianobacterias	Microcistina LR
Grande (Otamendi)	273.840	0,77
Chascomús	453.665	1,41
Salada (Monasterio)	915.168	0,97
Gómez (Junín)	192.915	0,76
Carpincho (Junín)	191.603	1,26
Triunfo (Lezama)	445.771	1,04
Helvecia (Canals)	146.139	No medido
Salada (Tedín Uriburu)	16.337	No medido

Abundancia de cianobacterias y concentración de la toxina microcistina LR en lagunas pampeanas monitoreadas en el marco del proyecto PAMPA 2. La columna de cianobacterias indica la medición máxima de células por mililitro de agua registrada entre octubre de 2012 y diciembre de 2015. La concentración de microcistina LR está en microgramos por litro de agua e indica el registro máximo entre enero de 2013 y agosto de 2017. En rojo, valores que superan el nivel guía definido por la Organización Mundial de la Salud (1 µg/l) para el agua potable. Según los criterios de este organismo, si en aguas de uso recreativo hay más de 20.000 células de cianobacterias por mililitro, se debe informar a los usuarios y a las autoridades; con más de 100.000, además de lo anterior, es necesario observar si se forman cúmulos, investigar los riesgos y restringir el baño.



Izquierda. Aspecto de una floración de cianobacterias en la playa Las Palmeras del embalse de Salto Grande, formado en el río Uruguay por el dique homónimo. **Derecha.** Cianobacterias de la especie *Microcystis aeruginosa* encontradas en Salto Grande fotografiadas con microscopio óptico a 400 aumentos. Esta especie produce neurotoxinas como la microcistina y puede causar peligrosas floraciones. La barra que da la escala mide unos 100 micrómetros. Foto Lic. Facundo Bordet



Boya de monitoreo continuo de las variables limnológicas estudiadas en el marco del proyecto PAMPA 2.

que beben agua de ambientes con floraciones pueden morir por intoxicación con cianotoxinas. Estos eventos generan elevadas pérdidas económicas asociadas con el agua potable, recreativa y agrícola. Tanto el calentamiento global como el aumento de la carga de nutrientes de los cuerpos de agua por la acción humana, igual que la regulación de los ríos mediante embalses, han promovido la intensidad y toxicidad de las floraciones de cianobacterias.

En la Argentina, las floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas afectan especialmente a los cuerpos de agua con menor profundidad de las regiones pam-

peana y chaqueña y a los embalses. Mediante un estudio estadístico llamado metaanálisis (citado entre las lecturas sugeridas), una de las autoras de este artículo (O'Farrell) y sus colaboradores encontraron que el 74,5% de las floraciones advertidas en la Argentina excedieron los umbrales de alerta establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Los resultados del proyecto PAMPA 2 mostraron que muchas lagunas de la región pampeana están seriamente comprometidas por floraciones tóxicas. A diferencia de otros países de la región, en la Argentina esta problemática ambiental no se considera actualmente entre los indicadores de calidad de agua. Ello convierte a las cianobacterias en una amenaza silenciosa para la salud humana, la biota acuática y la sustentabilidad del ecosistema.

Consideraciones finales

Dado que el fitoplancton, como comunidad microscópica muy sensible a los cambios ambientales, dice mucho sobre la integridad ecológica de un ecosistema acuático, en cualquier monitoreo que pretenda evaluar la calidad del agua es crucial el control periódico de la comunidad fitoplanctónica. Por otro lado, los estudios de ciencia básica enfocados a ella son de gran interés pues permiten comprender la dinámica ecológica del fitoplancton en diferentes sistemas acuáticos. En este sentido, la combinación de ciencia básica con sus aplicaciones es clave para mejorar la calidad de vida de la sociedad. 🇲🇦

LECTURAS SUGERIDAS

GIANNUZZI L (ed.), 2011, *Cianobacterias como determinantes ambientales de la salud*, Ministerio de Salud de la Nación, Buenos Aires.

KOSTEN S et al., 2012, 'Bimodal transparency as an indicator for alternative states in South American lakes', *Freshwater Biology*, 57: 1191-1201.

O'FARRELL I et al., 2019, 'Ecological meta-analysis of bloom-forming planktonic Cyanobacteria in Argentina', *Harmful Algae*, 83: 1-13.

PLASTANI MS et al., 2019, 'Recent environmental changes inferred from sediments in a shallow lake of the Argentinian pampas', *Journal of Paleolimnology*, 61: 37-52.

REYNOLDS CS, 2006, *Ecology of Phytoplankton*, Cambridge University Press.

TELL G, IZAGUIRRE I & O'FARRELL I (eds.), 2014, *Freshwater Phytoplankton of Argentina: Phytoplankton diversity and ecology in different aquatic systems*, *Advances in Limnology* 65, Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart.



Irina Izaguirre

Doctora en ciencias biológicas, UBA.
Investigadora principal del Conicet en el IEGEBA.
Profesora asociada, FCEYN, UBA.
iri@ege.fcen.uba.ar



Inés O'Farrell

Doctora en ciencias biológicas, UBA.
Investigadora principal del Conicet en el IEGEBA.
ines@ege.fcen.uba.ar



María Laura Sánchez

Doctora en ciencias biológicas, UBA.
Investigadora asistente del Conicet en el IEGEBA.
Ayudante de primera, FCEYN, UBA.
laurasanchez@ege.fcen.uba.ar