

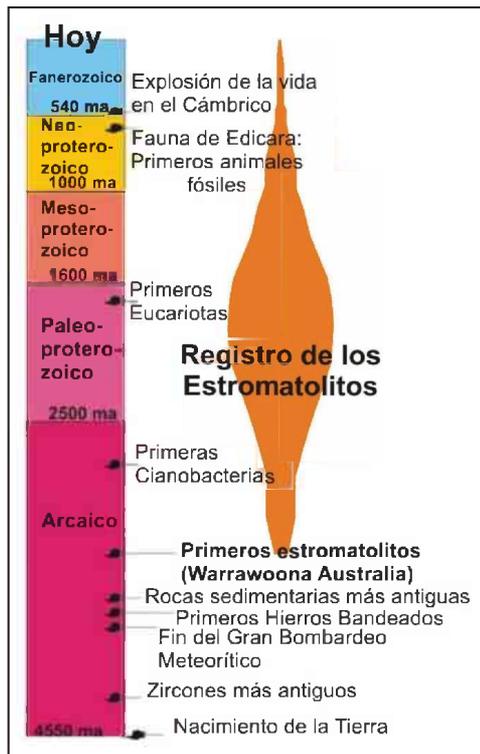
# Las cianobacterias: el invento más revolucionario



Ricardo O. Echenique

Desde su origen, las cianobacterias son sinónimo de impacto, ya sea por su trascendencia en la generación de nuestra atmósfera oxigénica, porque constituyeron la base de la dieta de varios pueblos o más recientemente, por su capacidad de generar compuestos olorosos y toxinas que afectan la ecología y la economía de los cuerpos de agua continentales donde se desarrollan masivamente.

**L**as cianobacterias, comúnmente conocidas como algas verdes-azules, son un grupo de microorganismos fascinantes, muy particulares, ya que combinan las características propias de las bacterias por un lado, con las de las plantas por otro. Habitan nuestro planeta desde hace 3000 a 3500 millones de años (Fig. 1), habiendo sido los primeros seres capaces de realizar fotosíntesis, proceso mediante el cual los organismos liberan oxígeno al medio. Ningún evento ha sido más importante para la historia de la vida en el planeta, ya que esto le proporcionó un escudo protector vital al planeta. A medida que el oxígeno aumentaba y se ampliaba la atmósfera, se vio favorecida la constitución de la capa de ozono. Todo este fenómeno ocasionó una drástica modificación ambiental, provocando profundos cambios en



1. Representación del desarrollo temporal de los estromatolitos, a partir de las cianobacterias.



2. Corte de un estromatolito, mostrando la estructura laminar alternada.

las condiciones planetarias, acelerando la evolución de la vida.

En palabras del Dr. Komárek, catedrático de la Universidad de Bohemia, República Checa y uno de los principales referentes en el estudio de este grupo de organismos, *“las cianobacterias son el invento más revolucionario que se ha generado en el planeta, al ser capaces de “robar” electrones al agua y producir energía y condensar el carbono y, como “residuo tóxico”, producir el oxígeno que disfrutamos todos”*.

Desde su origen, las cianobacterias se fueron adaptando a todo tipo de cambios, tanto climáticos como geoquímicos. Mas cerca en el tiempo, se aclimataron al impacto ocasionado por las acciones del hombre, que a través de sus actividades afectaron los cuerpos de agua continentales de todo el mundo, generando el sobre-enriquecimiento de nutrientes. Por otra parte, el incremento de las temperaturas en las últimas décadas, potenciado por el cambio climático, ha acelerado la presencia y permanencia masiva de cianobacterias en gran parte de ecosistemas acuáticos del planeta.

Algunas pruebas del origen de la vida en

nuestro planeta se expresan en estructuras geológicas de constitución sedimentaria, resultado de la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos, a partir de una combinación de organismos biológicos (originalmente cianobacterias, bacterias heterótrofas y quimiolitotróficas) que “retienen” y fijan sedimentos inorgánicos. Estas estructuras laminadas, litificadas, orgánico-sedimentarias formadas en ambientes lacustres y marinos desde el Triásico inferior (aproximadamente 250 millones de años), se denominan **estromatolitos** (del griego ‘stroma’ = tapiz y ‘lito’ = roca) (Fig. 2).

En nuestro país existen estromatolitos fósiles en gran cantidad de sitios (Neuquén, Chubut, Mendoza, San Juan, Catamarca, Buenos Aires, entre otros). Recientemente, fue descubierto un ecosistema único en la región de Tolar Grande (Salta, Argentina) donde se encuentra una serie de lagunas hipersalinas altoandinas, en las que perduran estromatolitos, tanto fosilizados como vivos (Fig. 3).

Las cianobacterias se reconocen como la base a partir de la cual se originaron las actuales células de las plantas terrestres, por su



3. Estromatolitos columnares en Tolar Grande (Salta, Argentina).

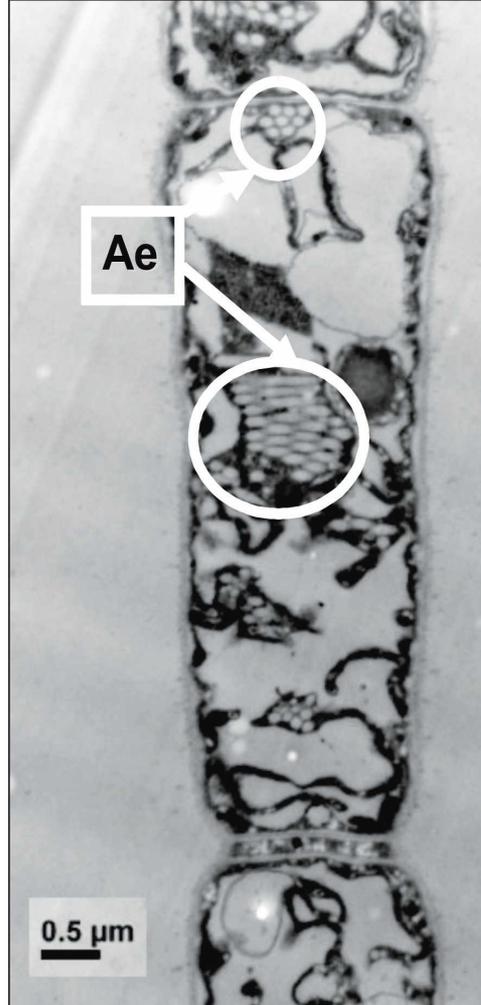
incorporación simbiótica a células de otros organismos. Evolutivamente, la clorofila no es más que la consecuencia de la presencia de cianobacterias en las plantas en forma de cloroplastos.

### La importancia estratégica de sus adaptaciones

Su larga persistencia en el tiempo y el espacio, se debe a su amplia gama de características morfológicas que permiten su adaptación a las más variadas condiciones ambientales. Es así que muchas especies presentan mucílago y/o vainas que las protegen de la desecación o de predadores, otras desarrollan estructuras de flotación (*vesículas gaseosas*) que se agrupan constituyendo estructuras múltiples (*aerotopos*), que posibilitan su nivelación dentro de la columna de agua, para optimizar la fotosíntesis y la captación de nutrientes (Fig. 4).

En el mismo orden, en condiciones de déficit de nitrógeno, algunas especies, pueden constituir células adaptadas para captar nitrógeno atmosférico (*heterocitos*) a partir de modificaciones en algunas de sus células vegetativas, estructuras que las hacen altamente competitivas frente a otros componentes del fitoplancton (Fig. 5). Asimismo, en períodos de “estrés ambiental”, ciertas células de algunas cianobacterias se modifican conformando estructuras de resistencia (*acinetos*), cuya función es almacenar sustancias de reserva (cianoficina) y así poder perdurar en el ambiente, a modo de “semillas”, las cuales, frente a la recuperación de óptimas condiciones ambientales, “germinan” y dan origen a nuevos organismos (Fig. 5).

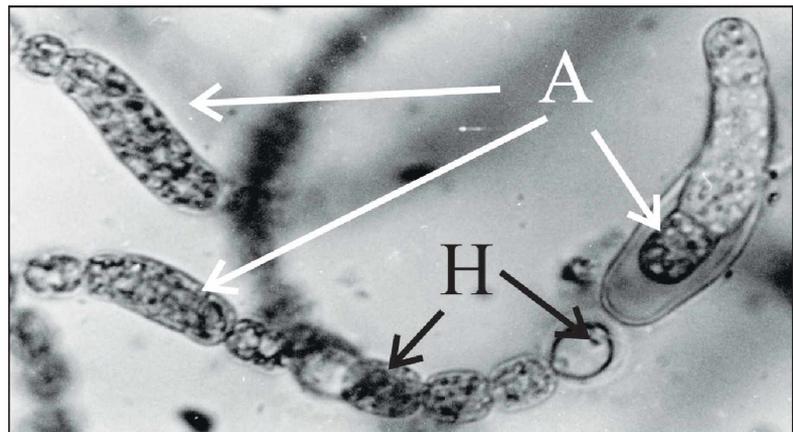
La notable capacidad de adaptación de las cianobacterias, permite que las en-



4. Aerotopos (Ae).

contremos tanto en áreas termales a altas temperaturas (70 a 73°C) (ej.: Copahue), como sobre rocas o en pequeños arroyos en la Antártida; en ambientes hipersalinos (lagunas en Socompa) e incluso endolíticas, dentro de rocas (ej.: Atacama). Asimismo, suelen encontrarse creciendo en forma simbiótica junto a hongos, constituyendo líquenes, o en forma rizomatoso sobre raíces de plantas, como con algunas *Cycadaceae*. Son

5. Células modificadas de algunas cianobacterias (H: heterocitos; A: acinetos).





6. Floraciones de cianobacterias.

organismos capaces de fertilizar suelos con nitrógeno o protegerlos de la desecación, constituyendo costras biológicas sobre suelos junto a musgos y líquenes (biocostras), cuya función fundamental es la retención del agua en ecosistemas de extrema aridez, temperatura, pH y salinidad. Asimismo, las cianobacterias poseen la capacidad de colaborar en el diseño del paisaje, ya que pueden conformar y romper rocas, o inversamente, fijar partículas de suelos, haciéndolos resistentes a la erosión eólica o hídrica, dada la producción de exopolisacáridos, compuestos complejos discriminados en dos formas principales: polisacáridos capsulares, asociados a la superficie celular y polisacáridos disueltos, liberados al medio.

Algunas cianobacterias que componen el fitoplancton, frente a condiciones ambientales óptimas, incrementan significativamente sus poblaciones. Considerando un ambiente bajo una alta radiación solar, tiempo de insolación solar amplio, temperaturas en torno a los 25°-30°C, calma climática con ausencia de vientos y buena disposición de nutrientes esenciales (nitrógeno y fósforo), se favorece el desarrollo de poblaciones de una o pocas especies en forma masiva y explosiva, permitiendo la constitución de las denominadas **floraciones** o **"blooms"** algales, fenómenos que pueden ser visualizados fácilmente, debido a la alteración del color e incluso de la densidad de las capas superiores de los cuerpos de agua afectados (Fig. 6).

## Efectos nocivos

El primer registro de florecimientos de cianobacterias que permitió que se las reconozcan como organismos capaces de producir toxinas, ocurrió en Australia, llamando la atención de los científicos por los

reportes de agricultores y veterinarios sobre la mortandad de animales, tanto silvestres como domésticos. Ya en 1878, Francis describió tales florecimientos ocurridos en el lago Alexandrina, como *"una espesa espuma, como una pintura verde aceitosa, de alrededor de dos a seis pulgadas de grosor. Los animales que bebieron del agua murieron de forma rápida y terrible"*.

En tanto, en Argentina, el primer registro de mortandad de animales (más de 1000 patos de criadero y una serie de animales silvestres), se registró en 1944, en la laguna Bedetti (Santa Fe).

Algunas especies de cianobacterias pueden producir toxinas con efectos adversos para distintas formas de vida, incluidos los humanos, y dentro de la misma población de cianobacterias pueden existir cepas (grupos de organismos) productoras y no productoras de toxinas.

Bajo estas condiciones, las cianobacterias potencian una serie de efectos nocivos como el taponamiento de filtros, principalmente de plantas potabilizadoras, la alteración de las características organolépticas del agua (olores y sabores), la reducción de la calidad estética y recreativa de los cuerpos de agua, toxicidad y reducción del oxígeno disuelto en la columna de agua.

## Taponamiento de filtros

Muchas especies de cianobacterias se caracterizan por presentarse en formas coloniales o filamentosas, que suelen conformar organismos de tamaño significativo, e incluso muchas de ellas están incluidas o rodeadas de vainas o mucílago, que posibilitan que estas se mantengan agregadas. De tal manera, en caso de presentarse constituyendo floraciones en un cuerpo de agua



**7a y b.** Desarrollo de una floración de cianobacterias en las proximidades de la toma de agua de la planta potabilizadora de Ensenada.

que se utilice como fuente de abastecimiento para potabilizar, suelen resultar un gran trastorno ya que ocasionan el taponamiento de filtros, lo que implica un incremento en la frecuencia de paro de planta para poder limpiar dichos filtros. Un ejemplo de este tipo de situación, fue lo sucedido durante el verano de 2021/22 en la cuenca del Río de la Plata (Fig. 7 a y b), donde se desarrolló una densa floración de cianobacterias que perduró durante varios meses, ocasionando serios trastornos en el área de Berisso, La Plata y Ensenada (Bs. As), afectando entre otros aspectos, el tratamiento del agua en la planta potabilizadora de la región, cuyos operadores debieron adaptar el funcionamiento en virtud del suceso, a fin de mitigar los trastornos ocasionados durante el mismo.

Muchas especies algales fitoplanctónicas que habitan cuerpos de agua continentales, suelen generar y liberar compuestos que alteran las características organolépticas de ambiente donde se desarrollan, alterando principalmente el sabor y el olor del agua. Las cianobacterias suelen generar estos cambios, consecuencia de la liberación de metabolitos secundarios volátiles ( $\beta$ -metilisoborneol (MIB) y/o geosmina), producidos por una importante variedad de especies de este grupo. Su presencia en agua de red indica un ineficiente proceso de potabilización, que redundará en una merma

de la calidad del agua tratada y ocasiona los obvios reclamos de la población.

Cabe destacar que en el año 1999, en el embalse Paso de las Piedras (Buenos Aires), se desarrolló una floración compuesta de *Dolichospermum circinale* y *Microcystis aeruginosa* que, además de ocasionar trastornos por su potencial capacidad de generar toxinas, liberaron compuestos volátiles (geosmina), que fueron fuertemente percibidos en el agua de red de las ciudades de Bahía Blanca y Punta Alta (Buenos Aires) y generaron un importante reclamo de parte de los usuarios, lo que llevó a la intervención del estado provincial, sobre la empresa concesionaria, a efectos de corregir la situación.

Los olores y sabores desagradables se convierten en un problema durante los meses más cálidos, cuando las temperaturas más altas fomentan el crecimiento de cianobacterias.

### **Reducción de la calidad estética y recreativa de los cuerpos de agua**

Las floraciones de cianobacterias suelen afectar severamente la calidad estética de los cuerpos de agua donde se desarrollan. La expansión de estos fenómenos se ha convertido en una gran preocupación para

las comunidades de todo el mundo, y más aún si las responsables son cepas nocivas, tanto por su potencial capacidad de generar cianotoxinas, como de liberar compuestos volátiles olorosos.

Las floraciones suelen impactar económicamente en muchos sectores, pudiendo generar trastornos, por ejemplo, en las actividades agrícolas, pesqueras, recreativas, en la potabilización de agua, en la industria del turismo e incluso llega a incidir en la depreciación de los bienes inmuebles en las zonas costeras próximas a los cuerpos de agua afectados.

## Toxicidad

De acuerdo con los efectos que ocasionan, las toxinas de las cianobacterias (cianotoxinas) pueden ser clasificadas en neurotóxicas, hepatotóxicas y dermatotóxicas.

Las *neurotoxinas* (saxitoxinas o anatoxinas), afectan el sistema nervioso afectando la transmisión del impulso nervioso, pudiendo provocar temblores musculares, náuseas, parálisis e incluso la muerte por paro cardíaco o respiratorio, causado por parálisis muscular. Las *hepatotoxinas* (microcystinas, nodularinas y cylindrospermopsinas), producen lesiones hepáticas, causan dolor abdominal, vómitos, diarrea y debilidad, pudiendo conducir a la muerte por hemorragia intrahepática y choque hipovolémico. A estas toxinas, en dosis subletales, se les atribuyen efectos carcinogénicos, como promotoras de tumores hepáticos. Las *dermatotoxinas* si bien no son letales, pueden ocasionar, por contacto, irritación cutánea, ojos, nariz y garganta y afecciones en las conjuntivas.

También se han registrado múltiples casos de enfermedades y muerte de animales domésticos y salvajes relacionadas con las cianotoxinas en todo el mundo. Solo por citar algunos casos, en Argentina se describió, en 1944, la mortandad de 100 patos de criadero y de una serie de animales silvestres, en la laguna Bedetti (Santo Tomé, Santa Fe); en 1984, la muerte de aproximadamente 70 vacas en un campo de Goyena (Buenos Aires) y en 1997, se estudió la mortandad de ganado y aves, asociadas a una floración de

*Dolichospermum (Anabaena) spirooides*, en la laguna Portmann (Santa Fe).

Las cianotoxinas no son eliminadas por los tratamientos de potabilización de rutina (coagulación, floculación, filtración y desinfección), incluso con este tipo de procesamiento puede producirse la liberación de las cianotoxinas por ruptura celular. Por otro lado, los tratamientos inadecuados de desinfección con cloro pueden generar compuestos organoclorados (trihalometanos), considerados cancerígenos. Por tal motivo, en los períodos de alta densidad de cianobacterias en la fuente, se recomienda incorporar tratamientos complementarios, mediante el uso de carbón activado (en polvo o filtros), el cual remueve más eficientemente las cianobacterias y las cianotoxinas presentes.

## Reducción del oxígeno disuelto en la columna de agua

En cuanto a los efectos indirectos generados por las floraciones, el más destacado es el causado por el desarrollo masivo de cianobacterias planctónicas. Cuando esto ocurre, se produce una disminución de la concentración del oxígeno en la columna de agua principalmente en las capas más profundas, donde la reducción llega a niveles de anoxia. Esto afecta principalmente a comunidades que habitan las zonas más profundas de dichos cuerpos de agua, fundamentalmente los peces, causando en ocasiones la muerte de grandes cantidades de ellos (Fig. 8).

## Impacto en plantas potabilizadoras

Como ya se mencionara más arriba, uno de los trastornos más destacados que las cianobacterias pueden ocasionar al hombre, es el que producen estos organismos durante el tratamiento de agua en las plantas potabilizadoras. En ocasión de floraciones en las fuentes, la presencia de cianobacterias produce una significativa alteración en la ru-



8. Mortandad de peces por anoxia, ocasionada por una floración de cianobacterias.

tina de los operadores de las plantas, ya que en primer término se produce con mayor frecuencia la colmatación y taponamiento de los filtros y dada la posible presencia de cepas cianotóxicas, se deben iniciar procesos preventivos dado el potencial riesgo de presencia de cianotoxinas, empleando técnicas y compuestos específicos, a fin de alcanzar los estándares necesarios para generar agua potable de calidad, lo que adiciona importantes aumentos en los costos.

Para mitigar situaciones de toxicidad en el agua de la fuente, las plantas de potabilización deben contar con apropiados planes de contingencia, así como métodos complementarios que posibiliten la remoción de cianotoxinas. Asimismo, resulta imprescindible la comunicación a los usuarios, sobre los riesgos que ocasiona la presencia de floraciones de cianobacterias nocivas en las fuentes, informando y sensibilizando correctamente y de forma planificada al público, sobre las medidas de protección sanitaria, respondiendo a sus inquietudes y tratando de disminuir la ansiedad, a fin de atenuar los efectos negativos de estos fenómenos, en momentos críticos.

### **Efectos de las distintas cianotoxinas sobre la salud**

Como ya se mencionó, algunas cianobacterias constituyen un riesgo para la salud pública por la utilización del agua afectada por floraciones de cianobacterias, tanto para su consumo como para realizar actividades

de recreo. El consumo de esta agua, sin el tratamiento adecuado para la retención de microorganismos y de sus toxinas, puede ser responsable de enfermedades agudas o crónicas, dependiendo de la dosis y del tiempo de la exposición.

La salud humana en ambientes de recreación puede ser afectada por la inhalación de microgotas conteniendo cianobacterias, por la ingestión del agua o por contacto directo, situaciones que pueden ocurrir accidentalmente o por la práctica de deportes acuáticos en sectores donde se desarrollan floraciones de cianobacterias. La inhalación puede producir síntomas alérgicos, tales como rinitis, conjuntivitis, dipnea o bronquitis aguda. El contacto puede desencadenar irritación ocular, conjuntivitis, dermatitis, obstrucción nasal, asma, etc. En tanto, la ingestión de agua conteniendo elevadas dosis de toxinas puede provocar intoxicaciones agudas, caracterizadas por un cuadro de gastroenteritis con diarrea, vómitos, náuseas, cólicos abdominales, fiebre y astenia. La ingestión continua de bajas dosis de cianotoxinas puede producir afecciones hepáticas crónicas.

En seres humanos, el primer caso sobre intoxicación por cianobacterias presentes en fuentes de agua potable, se registró en 1931 en el río Ohio (Estados Unidos). En América del Sur la primera descripción de hepatotoxicidad por intoxicación aguda grave por microcystina, fue reportada en pacientes dializados por contaminación del agua de diálisis. Este episodio, ocurrido en 1996 en la localidad de Caruarú (Brasil), afectó a 116 pacientes, de los cuales fallecieron 60,

por trastornos hepáticos ocasionados por las cianotoxinas presentes en el agua de diálisis. Otros dos casos, aunque no mortales, ocurrieron en 2007, en el embalse Salto Grande (Argentina) y en el 2015, en las playas del Río de la Plata (en la costa de Uruguay).

Generalmente, las personas más sensibles al efecto nocivo de las cianotoxinas, resultan ser los niños, que suelen ser afectados por la ingesta accidental de agua durante el baño o por los juegos habituales con la arena, en la orilla.

## Evaluación de riesgo y control de floraciones de cianobacterias

Las directrices sobre la calidad del agua potable recomiendan niveles tolerables para los componentes que pueden amenazar la salud pública; por lo tanto, es importante para las autoridades de suministro de agua. Los estados desarrollan valores de referencia basados en las directrices sugeridas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la calidad del agua potable. Estas pautas tienen en consideración los riesgos que representan para la salud los productos químicos y los microorganismos presentes en las fuentes de abastecimiento.

Los lineamientos son fundamentales para desarrollar estrategias adecuadas de gestión de riesgos. Con relación a las cianotoxinas y los riesgos para la salud, hace mención a la concentración de microcystinas totales en el agua potable (OMS 1.0 µg por L<sup>-1</sup>).

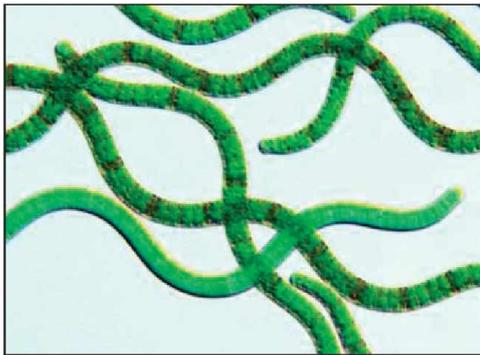
En Argentina, no existe legislación formal que considere niveles de riesgo sobre presencia de cianobacterias y sus toxinas. Sin embargo, en algunas regiones se efectúan controles por monitoreos de los ambientes de riesgo y se establecieron planes de alerta basados en la densidad celular de las cianobacterias de riesgo y en algunos casos, consideran la concentración de microcystina utilizando test específicos (ELISA), aceptando el valor límite de microcystina en agua de red sugerido por la OMS. Esto requiere del planeamiento e implementación de adecuadas políticas públicas.

Reducir la carga de nutrientes que in-

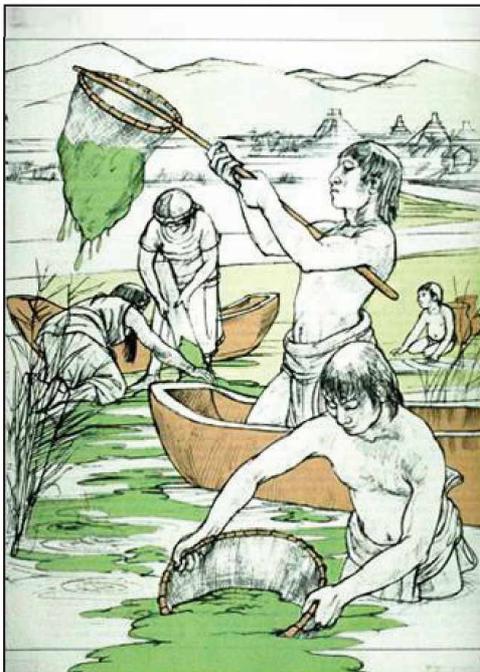
gresan a las cuencas hídricas podría ayudar a limitar el crecimiento de cianobacterias nocivas. Sin embargo, esto requiere cambios radicales en las actividades urbanas, agrícolas e industriales que favorecen la contaminación por nutrientes y sus principales fuentes son: la agricultura, la acuicultura, la cría de animales, el vuelco de aguas residuales crudas, las aguas pluviales, los combustibles fósiles y los desechos hogareños. Esta variedad de fuentes, hace que la contaminación resulte muy difícil de controlar.

## Cianobacterias alimenticias

Un gran número de especies de cianobacterias acompañan la economía del hombre desde hace cientos de años. En los relatos de los conquistadores de América, se describe que los Aztecas, habitantes del Valle de México, se alimentaban con "*Spirulina*" (*Arthrospira*) (Fig. 9), lo que llamaban "*Tecuitatl*", "*Acuitatl*", "*Azóquitl*" o "*Amomoxtlí*", que colectaban desde las orillas del lago Texcoco (Fig. 10). La combinaban con maíz tostado o tomate, en forma de tortas o tortillas. En otras latitudes, los Kanembu, tribu que habita las proximidades del lago Chad (África Central), a partir de arribazones de densas masas de "*Spirulina*", consumían en forma de galletas o tortas, a las que llamaban "*dihe*" (Fig. 11 a y b). Esta dieta posibilitó que, en períodos de hambruna, estas comunidades sobrevivieran consumiendo alimentos derivados o combinados con este organismo. Esta especie, entre otras virtudes posee, por cada 100 gramos de material seco, entre un 50 y un 70% de proteínas, entre un 8 y un 14% de glúcidos y aproximadamente un 6% de lípidos, ficocianina, ficobilina, todas las vitaminas del grupo B, vitamina K, ácido fólico, carotenoides, β caroteno y minerales esenciales (sodio, potasio, calcio, fósforo, hierro, entre otros) y un valor nutricional de aproximadamente 290 kcal. Actualmente, a través de la acuicultura, esta especie se cultiva masivamente en biorreactores o grandes "estanques o piletones" (Fig. 12a) y se cosecha periódicamente dejándola secar, posteriormente se pulveriza logrando un polvo con el que se elaboran pastillas o



9. Tricomas (filamentos) de *Arthrospira* (*Spirulina*).



10. Aztecas cosechando *Spirulina* en el lago Texcoco (México).

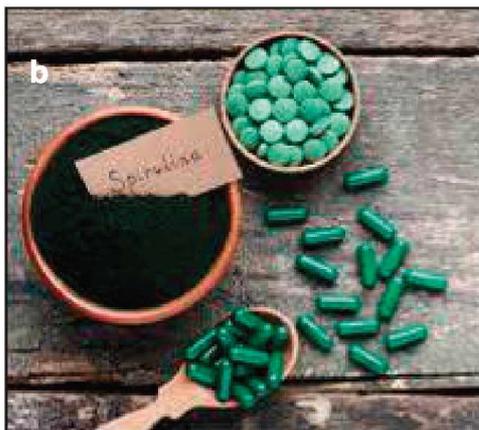
comprimidos que se venden fundamentalmente para su consumo como suplementos dietéticos (Fig. 12b).

Por otra parte, desde hace siglos los pueblos que habitan la región altoandina en proximidades del lago Titicaca, quechuas y aymaras, consumen en diversas comidas, *Nostoc*, al que llaman “*Cushuro*”, “*Murmunta*”, “*Llayta*” o “*Llullucha*”. El *Nostoc*, es una cianobacteria esférica, de entre 5 y 50 mm de diámetro, de aspecto similar al de las uvas (Fig. 13). En algunas ciudades del Perú (Arequipa, Cuzco, Trujillo, Huaraz, etc.), este organismo resulta uno de los ingredientes de platos predilectos en las fiestas de Semana Santa, constituyendo parte importante de su cultura alimentaria y de sus tradiciones



11. a. Kanembus cosechando *Spirulina* en el lago Chad (Africa) y 1b. Comerciando.

12. a. Cultivo de *Arthrospira* (*Spirulina*) en biorreactores y b. Pastillas y cápsulas de *Spirulina*, como suplemento dietético.





13. *Nostoc sphaericum*, "Cushuro", cosechado en una granja de Puno, Perú.



14. Gastronomía peruana, conteniendo *Cushuro* entre sus ingredientes.

15. Afiche promocional del consumo del *Cushuro*.



festivas (Fig. 14), e incluso el gobierno de ese país, promueve su consumo, dadas sus propiedades alimenticias (Fig. 15).

Concluyendo, podemos asumir que las cianobacterias son microorganismos muy antiguos que no han cambiado significativamente desde sus orígenes hace aproximadamente 3.500 millones de años; que han impactado muy fuertemente en la evolución de nuestro planeta por ser los responsables primigenios en la generación de nuestra atmósfera, ocasionando el paso más grande en la evolución de la vida planetaria; que han constituido, algunos de sus representantes, parte fundamental de la dieta alimenticia, en pueblos de América y del África y desde hace algo más de una centuria, representan un gran desafío, por su capacidad de generar compuestos nocivos en cuerpos de agua continentales, tanto para el hombre, como para la fauna, doméstica y/o silvestre. ♦

Ricardo O. Echenique  
 División Ficología "Sebastián A. Guarrera", Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) – CIC-BA.