

DOSSIER

ENERGÍA Y AMBIENTE

BIOENERGÍA Y BIORREMEDIACIÓN

Coordinado por Hugo Luis Corso

Nuestro planeta enfrenta dos grandes desafíos: la demanda energética de una población creciente y la contaminación ambiental como amenaza a un modo de vida sustentable y en armonía con el ambiente. A pesar de la declinación de las existencias de hidrocarburos, la energía térmica producida por su combustión sigue siendo un componente importante de la matriz de generación energética, y el mayor aportante de gases de efecto invernadero.

En nuestro país, de los 41.951 MW de potencia instalada en 2020, el 60,5% correspondió a energía térmica, el 25,8% a hidráulica, 4,2% a nuclear y el 9,5% a energías renovables. La participación de las renovables, que abarcan biomasa, eólica, solar y biogás, llegó al 13% durante 2021, lo cual puede considerarse auspicioso desde el punto de vista de la diversidad en relación a fuentes de generación eléctrica.

Por otra parte, la contaminación ambiental es una consecuencia tanto de la generación energética como de la eliminación de efluentes domésticos e industriales. Un estudio reciente de la Comisión sobre Contaminación y Salud de la publicación *The Lancet*, señala que la contaminación fue la responsable de nueve millones de muertes en el mundo durante 2019. La contaminación del aire sigue siendo la mayor causa de mortalidad, con más del 70% del total de víctimas, mientras que a la contaminación del agua le correspondió el 15%. El plomo contribuyó aproximadamente con un 10%, y los riesgos laborales por exposición a sustancias tóxicas aportaron un porcentaje similar. Los autores del estudio concluyeron con un conjunto de recomendaciones, donde indican que “la contaminación, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad están estrechamente rela-

cionados. El control exitoso de estas amenazas conjuntas requiere una interfaz científico-política formal con apoyo global para informar la intervención, influir en la investigación y orientar la financiación”. Por su parte, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC) acaba de asegurar que el calentamiento global va a producir de manera inevitable consecuencias devastadoras, a las cuales las personas deberán adaptarse. En suma, todo el esfuerzo que se haga desde el sistema científico-tecnológico para desarrollar fuentes de energía limpias, reducir la contaminación ambiental y disminuir el calentamiento global limitando la emisión de gases de efecto invernadero, contribuirá a un mejoramiento del planeta.

Para contribuir a pensar en estas problemáticas, Desde la Patagonia organizó este dossier, invitando a tres profesionales, investigadoras del Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Comisión Nacional de Energía Atómica, a que nos den un panorama de sus trabajos, orientados a desarrollar formas novedosas de generación de energía, aprovechamiento de efluentes, captación de contaminantes y producción de nuevos combustibles, a través de métodos biológicos. El primer artículo, se refiere a la producción de biocombustibles a partir de la biomasa de algas. Particularmente, enfoca la producción de biodiesel a partir de aceites generados por las algas, el mejoramiento de esta capacidad y el aprovechamiento de la biomasa residual. El segundo, trata sobre sistemas bioelectroquímicos y la utilización de agentes biológicos para producir energía a partir de efluentes; nos ilustra sobre las celdas de combustible y las celdas electrolíticas microbianas, aplicables, por ejemplo, a la generación de hidrógeno. El dossier cierra con un artículo que nos introduce en la utilización de microalgas para la remediación de la contaminación por metales, la selección de cepas que se adaptan a ambientes contaminados, y los ensayos que se están realizando sobre remoción de diferentes metales en efluentes y reservorios acuáticos. Esperamos que este dossier sea un buen aporte para repensar a los residuos no como residuos o basura, sino como materias primas de otros procesos novedosos para la producción de nuevos bienes, la generación de energía, y la reducción de la contaminación mediante la extracción de sustancias peligrosas o no biodegradables del ambiente.

Palabras clave: Biocombustibles, bioenergía, captación de metales.

Hugo Luis Corso¹

Ingeniero Químico
hugocorso@gmail.com

¹ Ex Investigador del Centro Atómico Bariloche y ex Docente del Centro regional Universitario Bariloche (CRUB), Universidad Nacional del Comahue (UNCo).

DOSSIER

ENERGÍAS ALTERNATIVAS

BIOCOMBUSTIBLES: EL CASO DE LAS ALGAS

Las algas como una opción alternativa y sustentable en la provisión de una forma de energía esencial: Biocombustibles de tercera generación.

Carolina Bagnato

El consumo de energía aumenta conforme crecen las sociedades modernas y la demanda de industrialización de los países en vías de desarrollo. Esta situación lleva a la búsqueda de más y nuevas fuentes de energía para alimentar distintas necesidades, desde el consumo energético de un hogar, el de procesos industriales con consumos de distinto tipo, hasta combustibles líquidos en sus distintas variantes para abastecer el transporte. Una de las principales fuentes de energía comúnmente utilizada para suplir los distintos requerimientos energéticos es el petróleo. Esta mezcla singular de compuestos hidrocarbonados deriva de procesos de fosilización y larga acumulación de restos de microorganismos, animales y vegetales. Si bien la industria del petróleo resultó ser sumamente exitosa, desde un tiempo a esta parte se han identificado una serie de problemas con este material y la tecnología asociada a su explotación. El principal inconveniente es que se trata de un recurso no renovable, por lo que, llegado un punto, los depósitos de petróleo no alcanzarán para suplir la demanda mundial. Por otra parte, tanto las actividades de explotación como la combustión de este combustible son altamente contaminantes. En este contexto surge la búsqueda de formas de energía denominadas renovables y alternativas. Además, a esta búsqueda se suma la dimensión de sustentables, lo que significa que las alternativas no solo deben poder suplantar las distintas formas requeridas y

necesidades actuales, sino que además deben impactar lo menos posible en nuestro entorno y en el ambiente. Dentro de esta búsqueda quienes han tenido un desarrollo y crecimiento destacable son los biocombustibles.

Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles de origen biológico, derivados de biomasa, y representan una alternativa a los combustibles fósiles provenientes del petróleo. Según su origen se clasifican en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación. Los de primera generación son los derivados de especies vegetales, o sea de plantas. Este es el caso del biodiesel en donde los aceites extraídos de cultivos más o menos oleaginosos - tales como la soja- se transforman en ésteres de metanol, la forma química de este combustible. Otro ejemplo de este tipo lo constituye el bioetanol, donde a partir de los azúcares de plantas como el maíz o la caña de azúcar se produce el biocombustible. Es importante destacar que la producción de este tipo de biocombustibles requiere del uso de tierras cultivables, para sostener los cultivos, y que varias de las especies comúnmente utilizadas compiten con la producción y demanda del mercado alimenticio. Los biocombustibles de segunda generación apuntan a generar una alternativa a esta situación, proponiendo la utilización de desechos de la industria alimenticia, como por ejemplo el bagazo de la caña de azúcar o la grasa animal, para producir bioetanol y biodiésel, respectivamente. En la búsqueda de más y nuevas alternativas surgen los biocombustibles de tercera generación, que recomiendan el uso de biomasa, proveniente de microorganismos, para la producción de este tipo de combustibles. En este contexto, desde hace ya varias décadas, las algas han sido propuestas como excelentes candidatas para tal fin. Entre las características que las hacen especialmente atractivas, las que más destacan son que se trata de organismos fotosintéticos que pueden crecer usando la luz solar y dióxido de carbono como fuentes de energía y carbono. Además, pueden crecer en aguas salobre y marina, no aptas para consumo, así como en aguas residuales tales como los

Palabras clave: Biodiésel, biomasa algal, desechos, energías renovables, sustentabilidad.

Carolina Bagnato¹

Dra. en ciencias básicas y aplicadas
carolina.bagnato@cab.cnea.gov.ar

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Bariloche (CAB), Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable.

Recibido: 08/04/2022. Aceptado: 30/05/2022.

DOSSIER

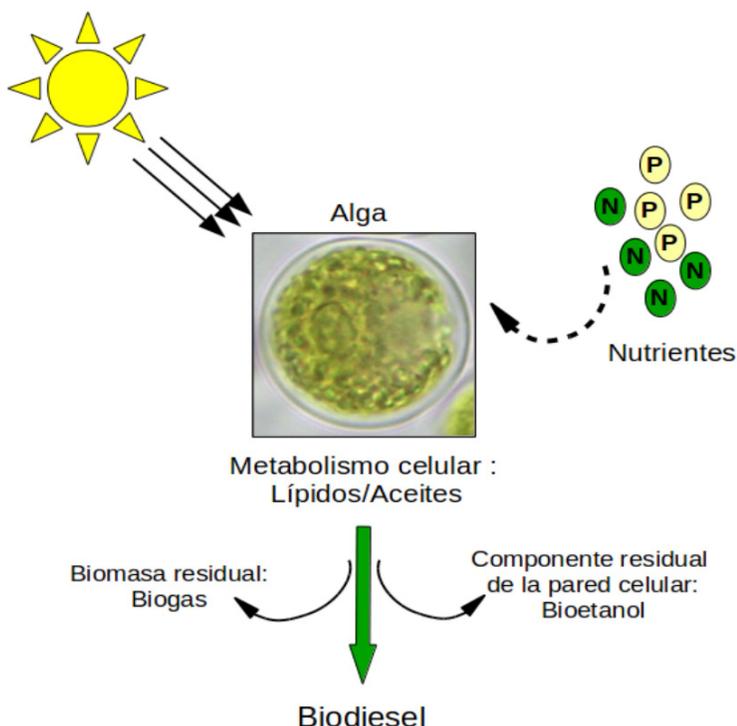


Figura 1. Las algas como fábricas celulares de biomasa en un proceso impulsado por energía solar y nutrientes. El esquema muestra una síntesis del proceso por el cual las células de algas (foto central), pueden mediante el metabolismo celular (fotosíntesis y otras vías metabólicas) transformar la energía solar, el dióxido de carbono y los nutrientes en biomasa. Luego esta puede ser utilizada en la producción de biocombustibles: biodiésel, bioetanol, biogás. N: nitrógeno; P: fósforo..

efluentes domésticos. Por otra parte sus cultivos pueden establecerse en zonas áridas de tierras poco fértiles, evitando su superposición con cultivos de la industria alimenticia y de esta manera la competencia con los mismos. A diferencia de las plantas, las algas poseen ciclos de vida cortos con tiempos de duplicación de su biomasa que, dependiendo de la fase del cultivo, puede ser de unas pocas horas. En relación con el tipo de biocombustible que de la biomasa de estos organismos se puede obtener, resulta interesante que distintos componentes de la biomasa algal podrían utilizarse para la producción de bioetanol y biodiésel. Más aún, la biomasa de algas puede usarse también en la generación de biogás. La Figura 1 presenta una síntesis del proceso y producción de distintas corrientes de biocombustibles representada sobre la estructura de un alga. El esquema grafica el potencial de la biomasa de algas y los principales insumos que se requieren para su desarrollo.

Biocombustibles de tercera generación: las algas

Como mencionamos anteriormente, las algas representan un grupo diverso de organismos cuya característica común es la de ser capaces de realizar fotosíntesis. Las hay de diferentes tamaños, microscópicas -denominadas microalgas-, y otras observables a simple vista, cuyos tamaños van desde unos pocos centímetros hasta varios metros, denominadas macroalgas. Son organismos acuáticos que habitan en agua dulce, salobre y marina.

También pueden vivir en ambientes extremos como puede ser el Río Agrío en la provincia de Neuquén, donde el agua es muy ácida, así como en estanques o piletas de desechos industriales donde están sometidas a distintos compuestos tóxicos. Esto muestra la versatilidad de estos organismos y su capacidad de resistir y adaptarse a diferentes condiciones ambientales. En la Figura 2A, se muestran distintas especies de algas, algunas aisladas de ambientes naturales y de ceparios (ver Glosario). Las fotos fueron tomadas en microscopio de campo claro, a partir de cultivos vivos, sin fijación ni tinción. La coloración que se observa, en tonos de verde, corresponde a los pigmentos fotosintéticos presentes en las algas. En las fotos se puede apreciar la diversidad de estos organismos en cuanto a su morfología y hábitos de vida. Por ejemplo: algunas crecen separadas, otras agrupadas en cenobios, algunas presentan ornamentaciones como espinas en tanto que otras poseen superficies lisas.

En relación con los biocombustibles, las microalgas han sido consideradas para la producción de biodiésel de tercera generación. Actualmente, el biodiésel está pensado para cortar y/o suplementar el diesel derivado de petróleo. Tal es así que los países establecen y requieren de diferentes cantidades de corte. En un proceso de transición aún, el porcentaje de corte es bajo, pero se prevé que vaya aumentando con el tiempo, por lo que se espera que la demanda de biodiésel crezca. El biodiésel se produce a partir de los lípidos de las algas (ver Glosario), específicamente con los triglicéridos (ver Glo-

DOSSIER

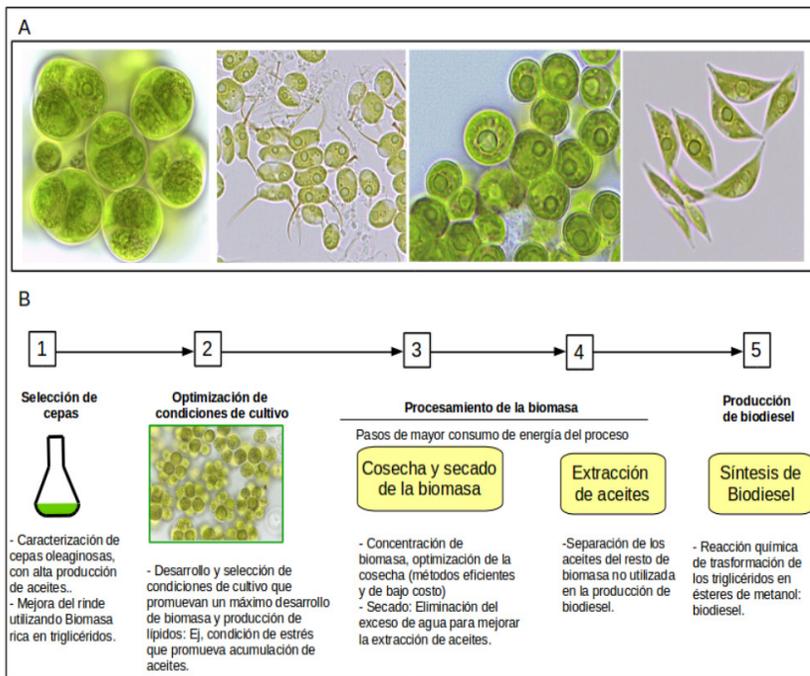


Figura 2. Diversidad de algas y pasos en la producción de biodiésel de algas. En el panel A, se pueden ver fotos de distintas especies/cepas de algas tomadas por microscopía óptica de campo claro (magnificación 100X). Todas las cepas forman parte del cepario del Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica. Las fotos fueron tomadas en el laboratorio del Instituto a partir de cultivos en crecimiento, sin fijar ni teñir. La coloración que se observa es la característica debido a los pigmentos fotosintéticos. En el panel B, se resume el proceso de producción de biodiésel en cinco pasos, el esquema permite ver la secuencia de las etapas, en qué consisten y los potenciales puntos de optimización del proceso.

sario) comúnmente llamados aceites. El proceso implica una reacción química que transforma a los mismos en largas cadenas carbonadas, libres, que pueden entrar en combustión o ser quemados entregando energía. En términos químicos, las cadenas de carbono del biodiésel se parecen mucho a las del diesel derivado de petróleo y es por eso que funcionan como tal.

¿Qué es lo que las hace tan interesantes?

Algunas especies de algas tienen la capacidad de generar y almacenar una cantidad considerable de aceites, al punto tal de que un alto porcentaje de su biomasa -entre un 30% y un 60%- puede estar constituida por este tipo de sustancias. A la capacidad intrínseca de las algas de producir aceites, se suma el hecho de que hay ciertas condiciones en las que pueden aumentar el contenido de aceites a nivel celular y por ende de los cultivos. La forma de inducir u "obligarlas" a sintetizar y almacenar más aceites es estresándolas. Por algún motivo, no muy claro aún, cuando se ejercen distintos tipos de estrés sobre los cultivos, se tiende a frenar su crecimiento y a acumular aceites. Originalmente, se observó que cuando las algas eran privadas de nitrógeno en sus medios de crecimiento, esto promovía el aumento de aceites en los cultivos. Luego se comprobó que otros tipos de estrés como la privación de otros nutrientes, el aumento del contenido de sales en el medio, o la alta intensidad lumínica, también tenían este efecto. Esto constituyó una estrategia para aumentar el rendimiento de los cultivos y de esta manera hacer más atractivo el proceso de producción de biodiésel a partir de este tipo de biomasa. La posibilidad de aumentar el rendimiento de los cultivos

hace que la biomasa que ciertas algas puedan generar sea una materia prima ideal para la producción de este combustible alternativo. En el interior celular los aceites forman estructuras esféricas que, en ocasiones, pueden ocupar gran parte del volumen celular. Durante el proceso de producción de biodiésel, este aceite debe ser extraído y modificado químicamente para su transformación en biocombustible. Para esto, la biomasa de algas que crece en suspensión en un medio acuoso, debe ser cosechada y el exceso de agua eliminado a través de un proceso de secado, para mejorar la eficiencia y los rendimientos de la transformación de aceites a biodiésel. La Figura 2 B, muestra la secuencia de pasos en el proceso de producción de biodiésel a partir de biomasa de algas. La Figura 3 muestra algunos ejemplos de algas oleaginosas, productoras de aceites, en condición de estrés, donde se puede apreciar la acumulación de los lípidos (aceites) en el interior celular.

Las algas: una alternativa sustentable

Como se mencionó anteriormente, para las nuevas tecnologías no alcanza con ser renovables, sino que además deben mostrar buenos rendimientos en términos energéticos y económicos, y ser sustentables, lo que implica, entre otras cosas, que el proceso de producción propuesto no debe generar mayores impactos en el ambiente que los que producen las tecnologías vigentes. En este contexto, el trabajo con microalgas se encuentra en un continuo proceso de mejora, tanto en los rendimientos de aceites de la biomasa, como de los pasos asociados a la cosecha, extracción de aceites y transformación de éstos a biodiésel. Por otra parte, en relación con la

DOSSIER

Figura 3. Cepas de algas con alto contenido lipídico. Las fotografías corresponden a distintas especies de algas que fueron inducidas, por privación de nitrógeno, a producir aceites. En el panel (A), se muestran cultivos de la cepa C1, aislada de un humedal de la estepa rionegrina, en tanto que en (B) se muestra un cultivo de la especie *Chlamydomonas reinhardtii*, proveniente de la colección *Chlamy center* (USA). En ambos casos las células fueron fijadas y teñidas con el colorante específico para lípidos Oil Red O. En los paneles (C) y (D) se muestran fotos del género *Prototheca* sp., una cepa super-productora de aceites. Las fotos fueron tomadas de cultivos vivos, sin fijar, representan el mismo campo fotografiado con microscopía nomarski y de fluorescencia. La coloración verde fluorescente en (d) evidencia los lípidos en el interior celular teñidos con el colorante específico *bodipy*.

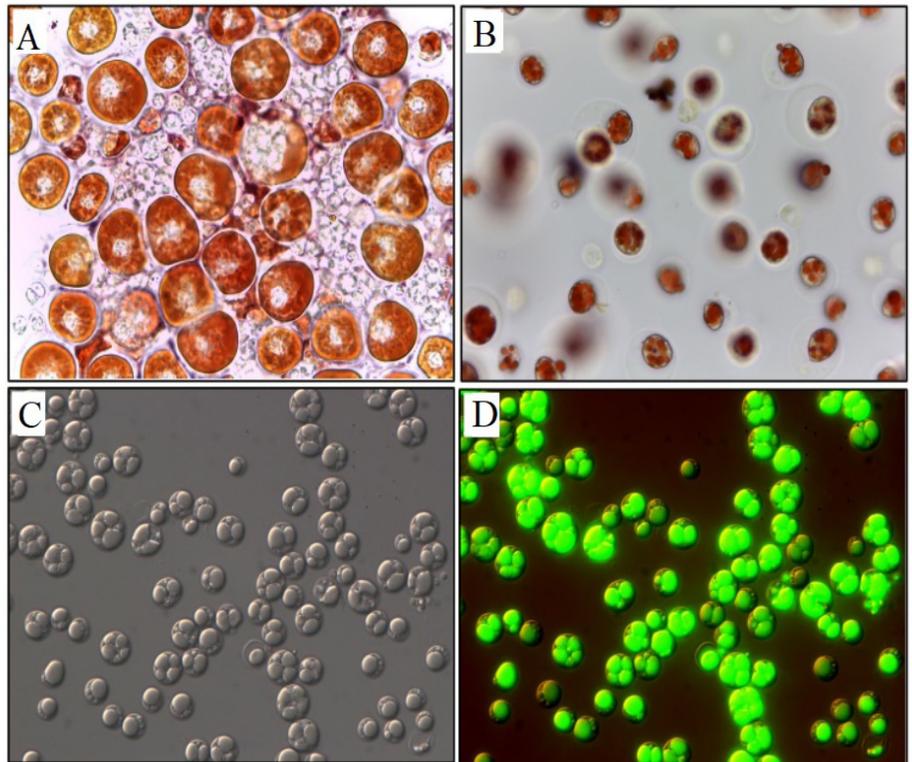


Imagen: gentileza de la autora.

sustentabilidad, se trabaja en la posibilidad de utilizar diferentes desechos y/o corrientes de residuos para llevar adelante el crecimiento de los cultivos. En este marco, el objetivo de estos trabajos es evaluar la posibilidad de, con los cultivos de algas, mitigar la generación de ciertos desechos y al mismo tiempo abaratar los costos de producción de biomasa usándolos como insumos del proceso. Entre las propuestas más comunes se encuentra la de usar el dióxido de carbono producido por procesos industriales. Recordemos que el dióxido de carbono es uno de los insumos básicos para la fotosíntesis. Lo que se hace es canalizar el gas dióxido producido por alguna industria e inyectarlo directamente en los cultivos. De esta manera no solo se logra promover el crecimiento de los cultivos a una mayor tasa, sino que también se consume, por transformación a biomasa, uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global. En esta línea también se propone el uso de efluentes domésticos como "medio" de cultivo para las algas. El efluente no solamente da el sustento y medio líquido a los cultivos, sino que también ofrece nutrientes básicos como fósforo y nitrógeno, esenciales para su desarrollo. Ambos elementos se encuentran en grandes cantidades en los efluentes domésticos y deben ser removidos previo a su vuelco en cuerpos de agua. Desechos tales como el dióxido de carbono y los efluentes domésticos, pueden usarse como insumos del proceso de producción de biomasa de algas para la produc-

ción de biocombustibles. De esta manera el proceso de desarrollo de biomasa contribuye al tratamiento y mitigación de ciertas corrientes de residuos o desechos. Esto permite pensar en la posibilidad de acoplar procesos de remediación o saneamiento ambiental al de producción de energías alternativas a gran escala.

Otra de las formas en la que la tecnología de algas para producción de biocombustibles propone ganar en sustentabilidad, es mediante el aprovechamiento de toda la biomasa producida. Como dijimos, para producción de biodiésel esencialmente se procede a extraer los aceites y utilizarlos en la conversión a biocombustible. Sin embargo, en la biomasa residual queda una cantidad de materia y energía que puede recibir otros usos. Por ejemplo, los nutrientes como fósforo y nitrógeno y la biomasa residual podrían utilizarse en la preparación de enmiendas orgánicas, para el mejoramiento de tierras, o como suplemento dietario animal. La misma biomasa residual podría alimentar un sistema de producción de biogás por procesos fermentativos, contribuyendo a la generación de energía. También podría usarse como biosorbente en la biorremediación de metales en efluentes industriales.

Entonces, podemos resumir la sustentabilidad del proceso de producción de biocombustibles utilizando biomasa de algas en una serie de cuestiones. En primer lugar, las algas pueden crecer a base de usar desechos, transformando estos en un material útil. En este contexto hay que considerar que los cultivos de algas, serán

DOSSIER

ya parte de los organismos que consumirán el dióxido de carbono que se genera durante la combustión de los biocombustibles que a partir de los mismos se produzca, contribuyendo de esta manera a reducir su propia huella de carbono (ver Glosario). Además, los cultivos y el desarrollo de biomasa de algas pueden usarse para mitigar el contenido de contaminantes como fósforo y nitrógeno, los cuales quedan contenidos en la biomasa residual del proceso de producción de biodiésel, desde donde pueden ser reutilizados. En este sentido, los cultivos de algas permitirían reciclar ambos nutrientes. Por último, el poder hacer un aprovechamiento de la biomasa residual aumenta la sustentabilidad del proceso porque podría mejorar el rendimiento económico del mismo y minimizar la generación de nuevos residuos.

Estado actual de la tecnología

Los primeros trabajos en los que se propuso utilizar a las algas en aplicaciones biotecnológicas datan de la década del '50. Sin embargo, si bien los cultivos de algas a gran escala han resultado muy exitosos para aplicaciones, por ejemplo en la industria alimenticia, en la actualidad no se registran emprendimientos comerciales en escala industrial para la producción de biodiésel. Esto se debe esencialmente a que aún la tecnología encuentra una serie de cuellos de botella en términos energéticos. Hay partes del proceso como la cosecha y el secado de la biomasa que, al día de hoy, insumen más energía que la que el actual rendimiento de aceites puede solventar. Pese a esto, y dadas las múltiples ventajas mencionadas, junto a la necesidad de obtener una fuente renovable de combustibles líquidos, las investigaciones en el área continúan. En este contexto se trabaja en la obtención de cepas de algas que produzcan grandes cantidades de aceites, utilizando desechos como insumos del proceso de producción, con pasos de procesamiento de la biomasa optimizados. Dada la necesidad de combustibles líquidos renovables y alternativos, la expectativa en esta tecnología es alta.

Resumen

La demanda de energía actual, sumado a que el petróleo es un recurso no renovable y altamente contaminante, requiere de la búsqueda de nuevas formas de energía renovables y sustentables. Dentro de esta problemática se enmarca la necesidad de generar opciones que puedan suplir, al menos en parte, la demanda de combustibles alternativos para el transporte. En el presente trabajo se introduce el concepto de biocombustibles, con énfasis en los llamados de tercera generación, y la opción que las algas constituyen para la producción de los mismos.

Glosario

Cepario: colección de microorganismos que se utiliza para preservar la diversidad biológica y poner a los mismos a disposición de la comunidad.

Efluentes domésticos: aguas residuales que se originan en actividades del hogar. Se trata de aguas provenientes del uso sanitario, cocina y lavado en general.

Huella de carbono: indicador ambiental que contempla la totalidad de gases de efecto invernadero que genera un individuo, una organización, un evento o un proceso.

Lípidos: conjunto de sustancias orgánicas cuyo rasgo común es ser poco o nada solubles en agua y ser solubles en solventes orgánicos como por ejemplo cloroformo.

Triglicéridos: lípidos simples derivados de glicerol y ácidos grasos. Son el principal componente de la grasa animal y los aceites vegetales.

Para ampliar este tema

- Acién Fernández, F. G., Fernández Sevilla, J. M. y Molina Grima, E. (2018). Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía. Universidad de Almería. *Mediterráneo Económico* 31, [Disponible en Internet].
- Behera, S., Singh, R., Arora, R., Sharma, N. K., Shukla, M. and Kumar, K. (2015). Scope of algae as third generation biofuels. Biochemical Conversion Division, Sardar Swaran Singh National Institute of Renewable Energy, Kapurthala, Punjab, India. *Frontiers in Bioengineering and biotechnology*.
- Khan, M. I., Shin, J. H. and Kim, J. D. (2018) The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products.. *Microbial Cell Factories*, 17: 36.

DOSSIER

CONVIRTIENDO AGUAS RESIDUALES EN UN RECURSO RENOVABLE

SISTEMAS BIOELECTROQUÍMICOS

Poco tiempo atrás, se describieron microorganismos con la asombrosa capacidad de crecer respirando electrodos. Esta aptitud los convirtió en una prometedora plataforma biotecnológica para convertir, de manera eficiente y autosostenible, contaminantes en electricidad.

María Belén Prados

Crisis energética. Esta es una frase que, hoy en día, a nadie sorprende. Hace años escuchamos sobre los altos requerimientos energéticos de la sociedad moderna, consecuencia de la industrialización y el incremento en la densidad poblacional. Este escenario trae aparejado diversos efectos nocivos sobre el medio ambiente, como las emisiones de gases de efecto invernadero, generadas principalmente por el uso de combustibles fósiles. Se acuñan entonces nuevos términos e índices, como la huella de carbono, la cual busca dimensionar el impacto que genera un proceso productivo en el ambiente. Así pues, crisis ambiental. Crisis a la que llegamos no solamente por la acumulación de gases de efecto invernadero, sino también por la sobreexplotación de los recursos naturales y por la acumulación de los pasivos ambientales (ver Glosario) generados por esta explotación.

Son numerosos los recursos naturales siendo sobreexplotados. Metales, bosques, agua. ¡Sí, agua! El agua es empleada en muchos procesos industriales, tanto como materia prima para, por ejemplo, la producción de cerveza, como para los procesos en sí (enfriamiento y lavado de equipos). También es utilizada por cada uno de nosotros en la vida cotidiana, como recurso vital y, paradójicamente, para llevarse nuestros

desechos fisiológicos lejos del hogar.

De esta forma, generamos aguas residuales domésticas e industriales (efluentes). Las mismas incluyen compuestos químicos con diversos tipos y grados de toxicidad, que van desde compuestos orgánicos simples o más complejos que pueden ser biodegradables, como las aguas cloacales, hasta compuestos inorgánicos y recalcitrantes, incluidos los metales pesados. Las aguas residuales, de una u otra manera, vuelven a los cuerpos de agua naturales. Sí, leyó bien: "vuelven a los cuerpos de agua naturales".

Idealmente, los efluentes son tratados previamente, antes de ser vertidos al ambiente natural. Sin embargo, según cifras publicadas por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) Argentina, se estima que el 80% de las aguas residuales son vertidas sin un tratamiento adecuado. Como ejemplo cercano, podemos mencionar la famosa "mancha del lago", que seguramente la mayoría de los vecinos de la ciudad de Bariloche recordarán. La existencia de cuerpos de agua altamente degradados y contaminados, es uno de los problemas ambientales más graves que padece la Argentina.

Este alto porcentaje de déficit de tratamiento se debe a varios motivos. Por un lado, los tratamientos convencionales de aguas cloacales son costosos: su instalación es compleja y la operación de las plantas consume grandes cantidades de energía para el bombeo y aireación de los efluentes, entre otros. Por otro lado, no se dispone en la actualidad de sistemas de tratamiento eficientes para muchos contaminantes industriales. En este grupo, podemos incluir también compuestos presentes en los efluentes cloacales, como diferentes medicamentos (principalmente antibióticos y antiinflamatorios) que consumimos y eliminamos a través de la orina y/o materia fecal, y que no son removidos mediante los sistemas actuales. Hoy, más del 40% de la población mundial se ve afectada por escasez de agua. Entonces, al escenario de crisis energética y

Palabras clave: biocombustibles, celdas de combustible microbianas, electromicrobiología, hidrógeno verde, metales pesados.

María Belén Prados¹

Dra. de la Universidad de Buenos Aires
mbprados@cab.cnea.gov.ar

¹Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Centro Atómico Bariloche (CAB)-Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Recibido: 31/03/2022. Aceptado: 23/05/2022.

DOSSIER

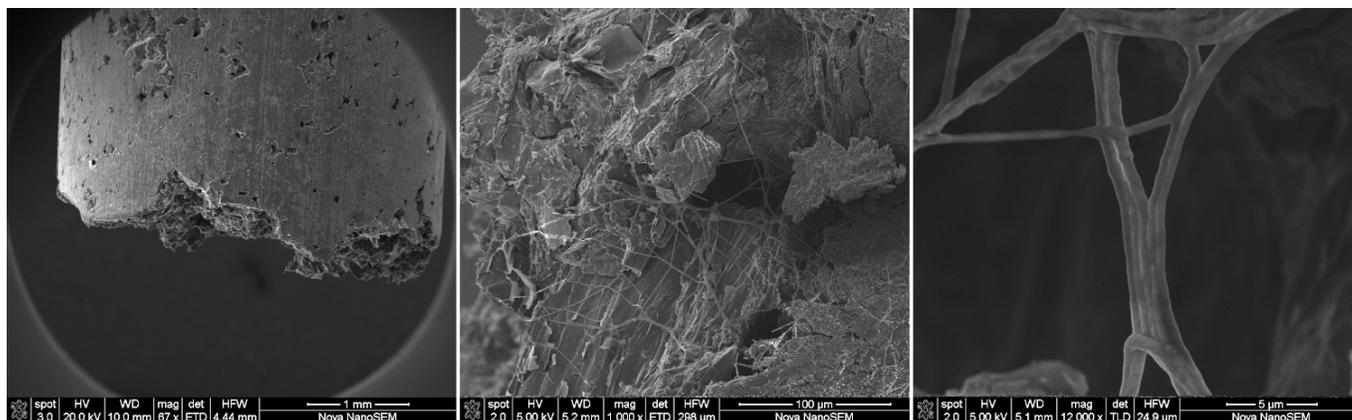


Imagen: gentileza de la autora.

Figura 1. Biofilm de bacterias electroactivas, tipo cable, aisladas de sedimentos contaminados del río Reconquista. Las bacterias se aislaron empleando un BES con una barra de grafito a modo de electrodo. La estructura del biofilm se observó mediante microscopía electrónica de barrido. De izquierda a derecha se ven imágenes de la superficie del electrodo, desde menor a mayor magnificación, lo que permite identificar la sucesión de bacterias que forman los cables.

ambiental le sumamos la crisis del agua, un recurso natural del cual ningún ser vivo puede prescindir.

No obstante, este escenario altamente preocupante constituye la fuerza impulsora para el desarrollo de nuevas tecnologías, donde se propone repensar los procesos productivos a fin de reducir la explotación de los recursos naturales y la generación de desechos. Esto se logra no solamente a través del reciclaje, sino también de la reutilización y revalorización de los “residuos”. Este replanteo constituye las bases de lo que se conoce como economía circular, y para alcanzar estos objetivos es fundamental comenzar por cambiar algunos paradigmas.

Cambiando paradigmas ¿Residuos o recursos?

Numerosos estudios demuestran que los compuestos orgánicos presentes en el conjunto de las aguas residuales contienen más energía interna que la cantidad de energía necesaria para tratar las mismas (empleando métodos convencionales). Por lo tanto, si esa energía pudiera aprovecharse, no se requeriría energía adicional para el tratamiento. Esto lo convertiría, como mínimo, en un proceso autosustentable y, como máximo, en un proceso de producción de energía asociada al tratamiento de efluentes.

Entonces, considerando que el ser humano genera inevitablemente efluentes domésticos o cloacales, podríamos ver a los mismos como un recurso renovable para la producción de energía. Esto se logra desarrollando sistemas de tratamiento capaces de convertir la energía química contenida en los efluentes en formas de energía utilizables, como el hidrógeno (H_2).

El hidrógeno es considerado el combustible ideal

dado que presenta un alto contenido energético y una combustión hacia agua, sin emisiones de dióxido de carbono. Por lo tanto, siempre y cuando su producción sea por métodos conocidos actualmente como verdes, es un combustible limpio. Además, el hidrógeno es utilizado como materia prima en una gran variedad de procesos industriales, como la hidrogenación de aceites en la industria alimenticia. La demanda de hidrógeno continuará incrementándose en los próximos años y su uso como vector de energía llevará a diversificar los actuales métodos de producción, buscando el desarrollo de procesos más eficientes, económicamente viables y sustentables.

En este sentido, se encuentran en desarrollo diferentes métodos biológicos de producción de hidrógeno (biohidrógeno). Entre éstos tenemos a los sistemas bioelectroquímicos, donde la valorización de residuos orgánicos mediante la producción de H_2 es una de sus aplicaciones más estudiadas.

Por otro lado, muchos efluentes industriales contienen otro tipo de recursos valiosos que serían interesantes de recuperar. Por ejemplo, el curtido de cueros emplea sales de cromo (Cr) durante el proceso. Una buena parte de este metal pesado (ver el artículo Microalgas y Biorremediación en este mismo dossier), va a parar a los efluentes que genera la curtiembre. En estos efluentes, el cromo se encuentra en general como cromo hexavalente (Cr^{6+}), el cual representa una seria amenaza sobre el ambiente y la salud, ya que es un compuesto carcinogénico y tóxico. A diferencia de muchos compuestos orgánicos, los metales no son biodegradables y además se acumulan en los tejidos, generando efectos deletéreos (ver Glosario) sobre la salud. Si bien existen métodos disponibles

DOSSIER

para remover cromo de los efluentes, presentan varias limitaciones. De este modo, si pudiésemos desarrollar un método eficiente que nos permita no solamente remover el metal del efluente sino también recuperarlo, se reduciría el impacto negativo de su vertido al ambiente y la explotación del mismo de depósitos naturales. Lo mismo sucede con otros metales de interés industrial como la plata y el uranio.

Como podemos ver, las aguas residuales son fuente de diversos recursos de gran valor. Por lo tanto, deberíamos modificar el enfoque actual del tratamiento de residuos y aguas residuales, hacia la recuperación de recursos. El aprovechamiento de los mismos no sólo disminuye el impacto ambiental, sino que a su vez genera efectos positivos, como ser la disminución de los costos de los tratamientos, de la explotación de los recursos naturales y de la generación de desechos.

Bacterias, ¿buenas o malas?

¡Ni una ni la otra! Pero, ¡qué mala fama tienen! Las bacterias son pequeños organismos unicelulares (microorganismos) y están entre las primeras formas de vida que aparecieron en la Tierra. Se encuentran en casi todos los hábitats terrestres: suelo, agua, sedimentos de ríos y mares; hasta ambientes extremos de temperatura y presión, como aguas termales ácidas, e incluso en desechos radioactivos. El cuerpo humano está lleno de bacterias, siendo la mayoría de ellas inofensivas y de gran utilidad. Las bacterias son vitales para la salud de todos los ecosistemas del planeta.

Una característica sumamente interesante de las bacterias es que presentan una alta diversidad metabólica (ver Glosario), a tal punto que, originalmente, su taxonomía (ver Glosario) se definía en base a este tipo de características, clasificándolas según qué tipo de compuestos empleasen como fuente de energía y cuáles como fuente de carbono para el crecimiento celular.

Esta diversidad metabólica de los microorganismos es aprovechada por la humanidad desde hace mucho tiempo, surgiendo así la biotecnología. Son muchos los procesos biotecnológicos tradicionales con los que seguramente estamos familiarizados: producción de derivados lácteos (yogures, quesos), bebidas alcohólicas y probióticos; producción de antibióticos e incluso el mejoramiento en el rendimiento de diferentes cultivos. Los campos de aplicación de la biotecnología son extensísimos, constituyendo la producción de biocombustibles y remediación ambiental dos áreas en intenso desarrollo.

A medida que vamos conociendo más y más la vida

que nos rodea, y las reacciones químicas y moléculas que sostienen los procesos vitales, podemos diseñar estrategias de producción según las necesidades de la población actual, respetando el entorno y promoviendo un uso eficiente y sustentable de los recursos. ¡Qué importante resulta entonces preservar la biodiversidad en toda sus escalas, desde los organismos microscópicos hasta los macroscópicos!

Bacterias electroactivas

Las células, tanto bacterianas como las de nuestro cuerpo, obtienen energía mediante un conjunto de reacciones químicas acopladas de óxido-reducción, donde un compuesto se oxida (dador de electrones) y otro se reduce (aceptor o receptor de electrones). Este conjunto de reacciones se conoce como respiración celular.

El patrón de sustratos oxidables es sumamente extenso, abarcando tanto compuestos orgánicos (diversos hidratos de carbono, aminoácidos, ácidos grasos...) como inorgánicos (hierro ferroso, amonio, hidrógeno, etc.). No obstante, no todas las células pueden oxidar cualquier compuesto. Es por ello que no podemos hacer yogur con cualquier bacteria. El espectro de aceptores de electrones es mucho más limitado, siendo mayoritariamente compuestos inorgánicos solubles como el oxígeno, nitrato y dióxido de carbono. Se denomina respiración celular aeróbica cuando el compuesto que se reduce es oxígeno y anaeróbica cuando es diferente al oxígeno.

Hacia finales de la década del '80 se describieron dos especies de bacterias que, en ausencia de oxígeno, presentan la asombrosa capacidad de acoplar la oxidación de un compuesto orgánico, como el acetato, a la reducción de óxidos de hierro y óxidos de manganeso, compuestos sólidos extracelulares. Este proceso se conoce hoy como reducción desasimilatoria de metales (los metales quedan fuera de la célula). Estos microorganismos corresponden a los géneros *Geobacter* y *Shewanella* y son fundamentales en los ciclos geoquímicos de los metales en la naturaleza.

Esta capacidad encontró rápidamente una aplicación, cuando se demostró que era posible sustituir los óxidos de los metales por electrodos. Es decir, que estas bacterias pudieron ceder los electrones provenientes de la oxidación del compuesto orgánico a un electrodo, generando así una corriente eléctrica y crecer en base a ello. En otras palabras, ¡crecieron respirando un electrodo! A este tipo de bacterias se las llamó bacterias electroactivas o electrogénicas.

Actualmente, los mecanismos empleados por las

DOSSIER

bacterias electroactivas para transferir electrones a un electrodo representan una temática de intenso estudio, en una nueva área denominada electromicrobiología. Hasta el momento, se han descrito tres tipos de mecanismos: contacto directo entre la célula bacteriana y el aceptor a través de proteínas específicas de la membrana celular externa, difusión de ciertos compuestos solubles sintetizados o no por los microorganismos y transporte de electrones a través de una matriz extracelular.

A su vez, se demostró la transferencia directa de electrones entre bacterias de diferentes especies (DIET por su sigla en inglés, *Direct Interspecies Electron Transfer*). Si ya nos parecía asombroso que una bacteria pueda crecer respirando un electrodo, el intercambio de electrones entre diferentes especies constituye un desafío científico, cuya comprensión contribuirá a mejorar los procesos tecnológicos actuales.

Numerosos informes han demostrado que los microorganismos electrogénicos están ampliamente

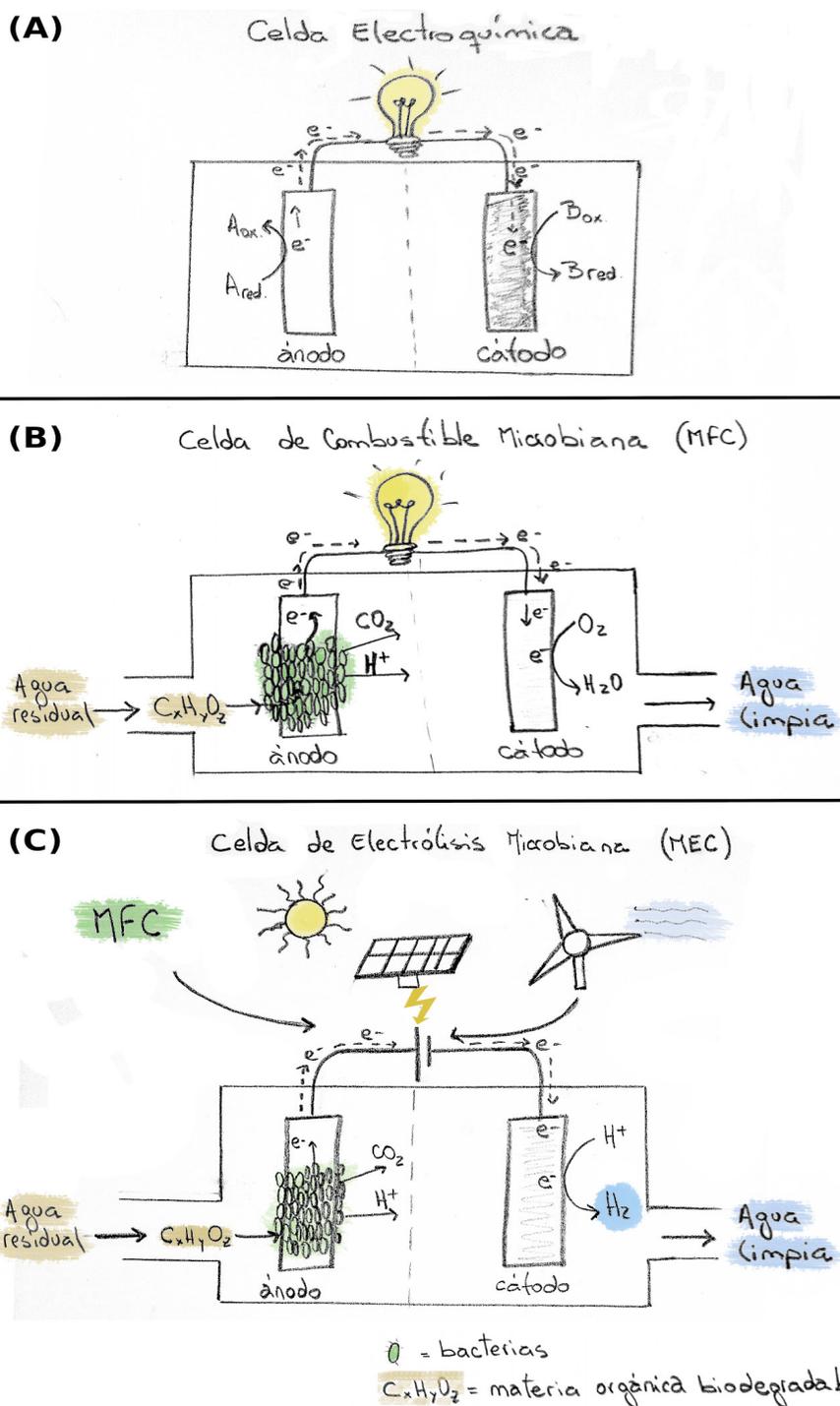


Figura 2. Sistemas Bioelectroquímicos. (A) Esquema simplificado de una celda electroquímica o galvánica, para la producción de electricidad a través de la oxidación espontánea de un compuesto químico A en el ánodo, acoplada a la reducción de un compuesto B en el cátodo. (B) Esquema de una Celda de Combustible Microbiana (MFC), donde las bacterias crecen adheridas a la superficie del ánodo, oxidan un compuesto orgánico (presente en aguas residuales domésticas, por ejemplo) y producen una corriente eléctrica. Como consecuencia de la oxidación del compuesto orgánico, el agua residual sale limpia de la celda (C) Esquema de una Celda de Electrólisis Microbiana (MEC), donde en ausencia de oxígeno en el cátodo y adicionando un poco de energía extra a la producida por las bacterias del ánodo, es posible reducir protones a hidrógeno en el cátodo. Siendo que la energía a adicionar puede provenir de una fuente renovable, las MEC representan un sistema de producción de hidrógeno verde.

DOSSIER

distribuidos en los ecosistemas naturales (ambientes marinos, de agua dulce, sedimentarios y del suelo). La capacidad de crecer respirando electrodos no se restringe a un género de bacterias, sino que día a día se van caracterizando más tipos de microorganismos electroactivos.

Recientemente, nuestro grupo de trabajo ha aislado una comunidad de microorganismos electroactivos de los sedimentos del río Reconquista (provincia de Buenos Aires), el cual presenta elevados niveles de contaminación. Esta comunidad ha mostrado una increíble estrategia de colonización de electrodos. Las bacterias desarrollaron "cables" que alcanzan una longitud de varios milímetros, formados por una sucesión de células que se extienden por toda la superficie del electrodo (ver Figura 1). Actualmente, estamos estudiando varias características de este *biofilm* (ver Glosario) a fin de establecer las oportunidades de aplicaciones tecnológicas del mismo.

Sistemas Bioelectroquímicos, ¿qué son?

Gracias a la diversidad microbiana y el ingenio de los tecnólogos, surgieron los denominados Sistemas Bioelectroquímicos (BES por su sigla en inglés, Bioelectrochemical Systems).

Para comprender de qué se tratan los BES, empecemos por describir una celda electroquímica. A rasgos muy generales, una celda electroquímica es un dispositivo integrado por dos electrodos conectados por un circuito externo, pero separados dentro de la celda por al menos una fase electrolito (ver Glosario y Figura 2A). La celda puede generar energía eléctrica a partir de una reacción química espontánea, como el caso de una pila, o bien utilizar energía eléctrica para producir una reacción química, como un electrolizador de agua para producir hidrógeno. En uno de los electrodos ocurren reacciones de oxidación, donde se liberan electrones que circulan por el circuito externo para ser consumidos en las reducciones que ocurren en el otro electrodo. En un BES las reacciones de oxidación, reducción o ambas son realizadas por microorganismos que crecen en contacto con los electrodos. En la actualidad existen diversas aplicaciones de BES. Por ejemplo, las celdas de combustible microbianas (MFC por su sigla en inglés, *Microbial Fuel Cell*) son BES empleados para generar corriente eléctrica a partir de la descomposición de la materia orgánica mediada por bacterias (ver Figura 2B). Las bacterias en el ánodo oxidan la materia orgánica, liberando electrones hacia el mismo. Esta corriente eléctrica fluye hacia el cátodo, donde los electrones se combinan con protones

y oxígeno para formar agua. La reacción ocurre en condiciones normales de presión y temperatura y es espontánea. Hasta ahora se han usado una variedad de sustratos biodegradables para generar energía eléctrica, incluyendo diversas aguas residuales.

En el año 2005, se patentaron las celdas de electrólisis microbiana (MEC por su sigla en inglés, *Microbial Electrolysis Cell*) para la producción de hidrógeno (ver Figura 2C). En este caso, al igual que en una MFC, las bacterias electrogénicas oxidan la materia orgánica y generan dióxido de carbono, electrones y protones. Los electrones son transferidos al ánodo y los protones son liberados a la solución. Los electrones fluyen a través de un circuito externo al cátodo donde, en ausencia de oxígeno, se consumen en la reducción de protones a hidrógeno. Esta reacción no es espontánea, es necesario adicionar una pequeña corriente eléctrica a la ya generada por los microorganismos, la cual puede provenir de una MFC o de otra fuente renovable.

Además de la producción de hidrógeno, los electrones derivados del metabolismo microbiano pueden aprovecharse para sintetizar otros compuestos de interés a partir de aguas residuales (dador de electrones) y dióxido de carbono (aceptor de electrones), como piruvato y butano. A estas celdas se las conoce como celdas de electrosíntesis microbiana.

Las aptitudes de los BES en el área de la biorremediación van más allá del tratamiento de compuestos orgánicos biodegradables. Se han desarrollado BES donde los electrones pueden ser usados para reducir óxidos de diferentes metales, como cromo (Cr^{6+}) y uranio (U^{6+}). La reducción de estos metales los convierte en formas menos móviles, evitando su dispersión y promoviendo su recuperación ya que los metales reducidos se depositan sobre el electrodo o precipitan al fondo del reactor.

De este modo, los BES podrían superar el desafío que plantean las aguas residuales heterogéneas o ambientes contaminados que incluyen desechos orgánicos de origen doméstico y contaminantes recalcitrantes de descargas industriales. Un claro ejemplo de un ambiente con estas características lo representa el río Reconquista, el cual constituye el segundo río con mayor contaminación del país, con altos niveles de cromo, entre otros compuestos químicos peligrosos.

El río Reconquista atraviesa 18 distritos densamente poblados (¡y altamente deteriorados!) del Gran Buenos Aires. A lo largo de su recorrido recibe numerosos canales tributarios, incorporando a sus aguas descargas domésticas e industriales (establecimientos texti-

DOSSIER

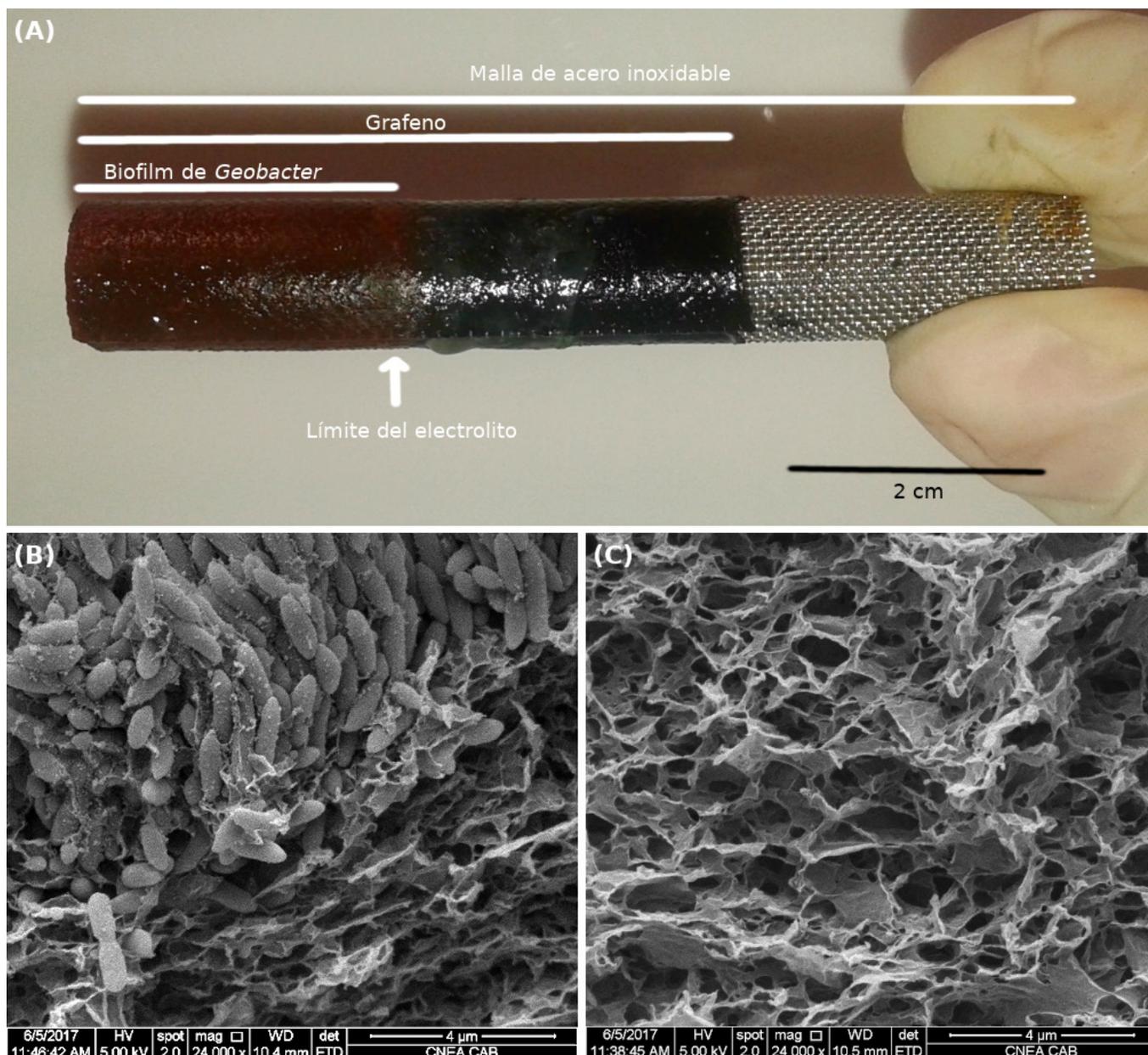


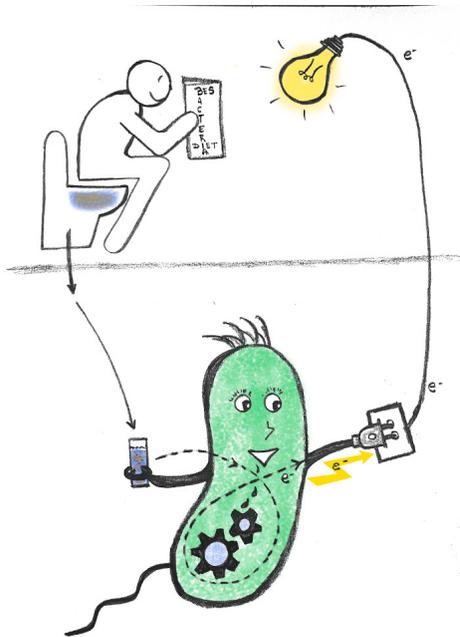
Figura 3. Electrodo a base de hidrogel de grafeno al final de la operación de una MEC. (A) El hidrogel de grafeno (gel negro de la superficie indicada) se autoensambló sobre una malla de acero inoxidable. Este electrodo se empleó como ánodo en un BES, inoculado con un cultivo puro de la bacteria electroactiva *Geobacter sulfurreducens*. El BES estuvo en funcionamiento continuo por más de 240 h. Durante este tiempo se observó a ojo desnudo el crecimiento de un biofilm bacteriano (capa roja) sobre la superficie del grafeno sumergido en el electrolito. (B) y (C) Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido del electrodo de grafeno: (B) zona donde se observa el biofilm bacteriano, con múltiples capas de bacterias (bacilos) sobre la superficie y dentro del gel; y (C) zona no sumergida y, por lo tanto, sin posibilidad de presentar crecimiento bacteriano, solamente se observa la estructura 3D del hidrogel.

les y químicos, frigoríficos, y curtiembres, entre otros). Debido a las características de sus aguas, los metales pesados se precipitan o adsorben en diferentes componentes minerales del sedimento, convirtiéndolo en un reservorio de estos metales.

En este contexto, nuestro grupo de investigación está trabajando en el desarrollo de un sistema de tra-

tamiento de sedimentos contaminados mediante la complementación de dos procesos: una primera etapa de biolixiviación (ver Glosario) de los metales del sedimento y una segunda etapa de reducción e inmovilización de los mismos mediante un sistema bioelectroquímico, con la eventual recuperación de materiales valiosos.

DOSSIER



Es posible convertir aguas residuales en un recurso renovable para la producción de energía a través de procesos biotecnológicos como los Sistemas Bioelectroquímicos (BES). Los BES aprovechan las aptitudes metabólicas de las bacterias electroactivas de acoplar la oxidación (degradación) de un compuesto orgánico a la reducción de un electrodo, generando así una corriente eléctrica. Por lo tanto, los BES permiten el tratamiento eficiente de efluentes asociado a la generación de energía.

BES, ¿sueño o realidad?

La producción de energía y recuperación de recursos a partir de efluentes empleando BES está demostrada y se han alcanzado avances en su rendimiento.

En 2008, se publicó la primer demostración de una celda de combustible microbiana como una alternativa a las baterías. Esta fue utilizada para la alimentación de una boya meteorológica, demostrando que los BES son buenos candidatos para la provisión de energía en zonas remotas.

A su vez, hay reportes de pruebas piloto para la conversión de efluentes industriales en hidrógeno. También se están implementando variantes de BES para el tratamiento de efluentes domésticos, sin gasto energético. En 2015, a través del proyecto *iMETland*, investigadores argentinos participaron en la validación global de un humedal artificial bioelectroquímico para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas comunidades (200 personas). Los humedales artificiales son sistemas de depuración de aguas. Estos se construyen simulando un humedal natural, al cual se vier-

ten las aguas residuales, las mismas son depuradas por la acción conjunta de plantas y microorganismos y es posible recuperar el agua limpia y reutilizarla para riego, por ejemplo. En los humedales artificiales bioelectroquímicos se hace uso del intercambio directo de electrones entre especies bacterianas (DIET) para aumentar la velocidad del tratamiento y disminuir el área requerida respecto de los humedales de tratamiento convencionales.

Sin embargo, actualmente la mayoría de las aplicaciones de BES se encuentran a escala de laboratorio. ¿Por qué?

Para alcanzar densidades de corriente elevadas en los BES es esencial que las bacterias electroactivas crezcan sobre el electrodo formando un biofilm y produzcan una alta densidad de corriente. La formación del *biofilm* se ve afectada por varios factores del material del electrodo (topografía, carga superficial y humectabilidad) y también de las bacterias (motilidad, producción de una matriz extracelular y señalización intercelular). Los electrodos para BES, además de ser conductores, deben ser biocompatibles (ver Glosario) y tener una elevada área superficial, capaz de ser colonizada por los microorganismos y mejorar las interacciones bacteria-electrodo.

Por lo tanto, parte del salto de sueño a realidad para las aplicaciones de los BES viene de la mano de la complementación entre diferentes áreas de la ciencia, en especial de los materiales y la biología.

En este sentido, nuestro grupo de investigación está desarrollando electrodos tridimensionales a base de grafeno (ver Figura 3). El grafeno es un material nanoestructurado de carbono bidimensional con propiedades únicas. Los electrodos producidos al momento, en forma de hidrogeles, presentaron un excelente rendimiento y estabilidad a largo plazo en celdas de electrólisis microbiana. Estos electrodos representan un material prometedor para el desarrollo de la tecnología, ya que el método de producción empleado permite la preparación de grandes cantidades de material y el bioproceso estudiado del ánodo es compartido por muchas de las aplicaciones de los BES.

Hoy, los BES constituyen una plataforma tecnológica versátil, capaz de convertir las aguas residuales en una fuente de recursos renovables.

DOSSIER

Glosario

Biocompatible: término que describe la cualidad de un material de no ser dañino o tóxico para un ser vivo.

Biofilm: agregado de microorganismos en el que las células se adhieren entre sí y/o a una superficie y, frecuentemente, están embebidas dentro de una matriz de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que ellas mismas producen.

Electrolito: solución formulada, generalmente, con agua como solvente y sales disueltas en ella. Las sales se disocian, en cationes y aniones, debido a las interacciones termodinámicas con el solvente. El electrolito es eléctricamente conductor a través del movimiento de iones, pero no conductor de electrones.

Lixiviación: proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Es una técnica frecuentemente utilizada en metalurgia para la extracción de minerales de depósitos naturales. La bio-lixivación aprovecha la capacidad de ciertos microorganismos de generar soluciones ácidas, las que sirven de disolvente para la extracción de metales pesados de suelos o sedimentos contaminados o, incluso, también para la bio-minería.

Metabolismo: conjunto de reacciones químicas que ocurren dentro de una célula y que permiten sostener la vida de la misma. Estas reacciones se dividen en dos grandes grupos; aquellas con las cuales la célula convierte la energía de los alimentos en energía disponible para ejecutar procesos celulares (catabolismo); y aquellas empleadas para la conversión de alimentos en componentes celulares básicos como proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y algunos carbohidratos (anabolismo).

Resumen

El incremento de la demanda energética y el deterioro del ambiente han impulsado el desarrollo de biotecnologías que den solución a estos problemas. Entre las mismas se encuentran los sistemas bioelectroquímicos (BES), los cuales permiten obtener energía del metabolismo microbiano a partir de diferentes efluentes. Esto es posible gracias a que algunos microorganismos, denominados electroactivos, forman *biofilms* sobre superficies sólidas que utilizan como aceptores de electrones de la respiración celular. Los materiales así modificados constituyen verdaderos electrodos que pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones de BES, como ser la síntesis de hidrógeno o la remoción de metales pesados de efluentes.

Pasivos ambientales: daños ambientales generados y no compensados, producidos por diferentes actividades humanas, entre ellos pozos petroleros abandonados y los residuos generados por la extracción del crudo.

Taxonomía: clasificación jerarquizada y sistemática de los seres vivos, estudia las relaciones de parentesco entre los organismos y su historia evolutiva.

Para ampliar este tema

Electromicrobiología. Bacterias y redes sociales. En: <https://www.youtube.co/watch?v=IRwFBV6OIOA>
 Biota. En: <https://www.youtube.com/watch?v=mD-1S yW6Lh4>
 Proyecto iMETland. En: <https://www.youtube.com/watch?v=4zwNpqCmiic>

DOSSIER

CONTAMINACIÓN CON METALES Y SU SANEAMIENTO MICROALGAS Y BIORREMEDIACIÓN

*En búsqueda de microalgas autóctonas para la remoción de metales.
Experiencias en la Patagonia.*

Gisela Ferraro

Durante las últimas décadas la contaminación ambiental ha aumentado considerablemente. La minería, la industria metalúrgica y el uso extensivo de fertilizantes minerales son las principales fuentes de contaminación por metales. Asimismo, el desecho inadecuado de artefactos de uso doméstico como pilas, artículos electrónicos, termómetros y cierto tipo de pinturas puede también contaminar el ambiente.

Los metales son elementos inorgánicos y son componentes naturales de la corteza de la tierra. Algunos de ellos, como cobre, zinc, hierro y manganeso, en bajas concentraciones, son esenciales para la vida. Sin embargo, en concentraciones más altas, entre 0,1 a 10 miligramos por mililitro (mg/mL), pueden resultar tóxicos. Mientras que otros metales, como uranio, cadmio, y plomo son considerados no esenciales porque no tienen una función biológica conocida, pero sí ejercen efectos negativos en los seres vivos incluso en concentraciones hasta cien veces menores, del orden de 0,001 a 0,1 mg/mL.

Tradicionalmente se clasificaba a los metales de acuerdo a su densidad, definiendo como metales pesados a aquellos cuya densidad es, por lo menos, cinco veces mayor que la del agua 5 g/mL. Sin embargo, la densidad específica no es un factor que permita definir la toxicidad de un elemento por lo que, actualmente, se está dejando de lado el uso de este término. Los metales de mayor preocupación, según

la Organización Mundial de la Salud (OMS), son el cadmio, el cromo, el cobalto, el cobre, el plomo, el níquel, el mercurio y el zinc. Los efectos que provocan estos metales sobre los seres vivos dependen de su concentración y de su biodisponibilidad (ver Glosario).

La contaminación por metales es altamente preocupante ya que no son biodegradables, es decir no pueden ser degradados y convertidos en sustancias inocuas o menos tóxicas. Además, otro problema asociado a la presencia de metales en el ambiente es la biomagnificación, esto es, la acumulación a lo largo de la cadena trófica lo que hace que cada organismo acumule en su interior una concentración superior a la que contiene alimento.

Los metales pueden causar daño en todos los seres vivos. A nivel molecular la toxicidad se da porque pueden desplazar cationes (ver Glosario) indispensables para el funcionamiento de enzimas, que son las proteínas que regulan y aceleran las reacciones en el interior celular. Además, los metales favorecen la formación de moléculas como las especies reactivas del oxígeno, que son muy dañinas para todos los componentes celulares. En humanos se ha visto que los principales órganos dañados por la presencia de metales son los riñones, el hígado, el estómago, los intestinos, los pulmones y el cerebro. Los metales podrían ingresar al organismo por inhalación o por ingestión de agua o de alimentos contaminados.

Metales en el agua

Los cuerpos de agua -como ríos, lagos y mares- son contaminados ya sea por el vertido de efluentes tratados inadecuadamente o por la incorporación de aguas contaminadas provenientes de zonas cercanas (Ver el artículo Sistemas Bioelectroquímicos en este mismo dossier). Cabe resaltar que el agua es el principal recurso natural indispensable para la vida y también lo es para el desarrollo, por lo que es fundamental encontrar una solución sostenible para su descontaminación.

Los métodos convencionales para la eliminación de metales del agua, emplean diferentes tecnologías fi-

Palabras clave: algas, ambiente, contaminación, cosecha, tecnología.

Gisela Ferraro¹

Dra. en Ciencias Biológicas
gisela.ferraro@cab.cnea.gov.ar

¹Centro Atómico Bariloche (CAB), Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable (IEDS)

Recibido: 08/04/2022. Aceptado: 24/05/2022.

DOSSIER

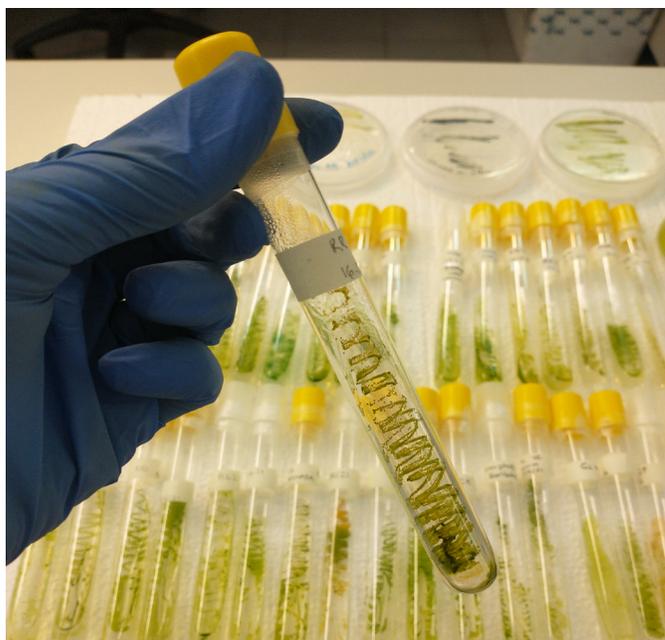


Imagen: gentileza de la autora.

Figura 1. Imagen del cepario de algas. La mayoría de las cepas se conserva en tubos de ensayo con medio de cultivo sólido. El color verde característico de los cultivos y las colonias de microalgas se debe a la presencia de clorofila. La clorofila es un grupo de pigmentos de color verde que se encuentra presente en los cloroplastos y que es esencial para el proceso de fotosíntesis.

sicoquímicas. Sin embargo, estas aplicaciones tienen limitaciones tecnológicas, un gran requerimiento energético y utilizan gran cantidad de reactivos químicos lo que puede provocar una contaminación secundaria. Además, son ineficientes para tratar soluciones con bajas concentraciones de metales (entre 0,1 y 100 mg/L). Teniendo en cuenta estas limitaciones y que las normas de descarga de aguas contaminadas son cada vez más estrictas, es indispensable el desarrollo de nuevas tecnologías que sean eficientes, de bajo costo y respetuosas con el ambiente. Entre estas nuevas alternativas se encuentra las tecnologías basadas en el empleo de microorganismos y plantas que actúan removiendo y eliminando los contaminantes del suelo y agua.

Biorremediación por microalgas

La biorremediación es la utilización de organismos vivos como bacterias, hongos, algas y plantas para degradar, transformar y/o remover compuestos tóxicos contaminantes presentes en el agua, el suelo y el aire, convirtiéndolos en productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Dentro del conjunto de estos seres vivos, las microalgas (nombre con el que se conoce a las algas unicelulares) han mostrado muy buenas capacidades de remoción de metales. El uso de microal-

gas para la remediación presenta numerosas ventajas. Entre ellas se encuentran la facilidad y los bajos costos de cultivo. Sumado a esto, han demostrado ser particularmente eficientes para la remoción de metales en efluentes con bajas concentraciones (hasta 100 mg/L), situación en la cual los métodos tradicionales se tornan ineficientes. En este sentido, son una alternativa ideal para tratar grandes volúmenes de aguas industriales complejas (que contienen generalmente diferentes metales, sales y compuestos orgánicos) con baja concentración de metales, pero lo suficientemente alta para superar los límites de toxicidad. Se han identificado varias algas con alto potencial para remover varios tipos de contaminantes como, metales herbicidas y pesticidas. Los tratamientos de remediación con microalgas idealmente deberían ser utilizados para tratar los efluentes industriales o mineros previos al vuelco de los mismos. Pero además podrían emplearse para remediar cuerpos de agua ya contaminados.

Las microalgas interactúan con el metal de diferentes maneras. La captación de metales es un proceso complejo que combina mecanismos activos y pasivos. Primero ocurre una unión del metal a la pared celular. Ese proceso se llama adsorción, es rápido y sucede tanto en células vivas como muertas. Además, puede ocurrir una absorción, que es el ingreso del metal al interior celular. Este proceso es más lento y ocurre solo en células vivas. Se ha demostrado que la principal forma por la cual las microalgas capturan los metales es por la unión de los mismos a diferentes moléculas presentes en la pared celular. Las paredes de las microalgas están compuestas por moléculas como hidratos de carbono, proteínas y lípidos que contienen grupos funcionales tales como carboxilo, hidroxilo, fosfato y amino que son los que, por una interacción fisicoquímica, se unen a los metales. La composición de la pared celular es específica para cada especie y además puede variar de acuerdo al estadio de crecimiento y a las condiciones del entorno en donde crecen. Entonces, las posibilidades de remover metal varían de acuerdo a la especie, a las condiciones del ambiente y al tipo de metal. Todas esas variables pueden ser ajustadas en el laboratorio para poder mejorar el proceso de descontaminación.

Debido a su adaptabilidad inherente, las algas nativas de ambientes contaminados poseen una mayor resistencia a la toxicidad del metal y muestran, además, una mejor eficiencia para capturar los metales. Entonces, resulta muy atractivo trabajar con este tipo de algas en los procesos de biorremediación. Es por esto que el primer paso que realizamos para desarrollar

DOSSIER

la tecnología de remoción de metales por cultivos de microalgas es el aislamiento de algas desde ambientes contaminados. En este sentido, la selección adecuada de la cepa algal es un paso necesario para desarrollar un proceso de biorremediación exitoso.

¿Quiénes son las microalgas?

Entre los organismos que habitan los ambientes acuáticos se encuentran las algas unicelulares que, como vimos, también son conocidas como microalgas. Son organismos fotosintéticos, es decir, producen su propio alimento (compuestos orgánicos) con la luz como fuente de energía y con el dióxido de carbono (CO₂) como fuente de carbono. Las microalgas son las responsables de la mayor parte de la materia orgánica de los ecosistemas acuáticos, realizando el 40% de la fotosíntesis total del planeta.

Existe una amplia diversidad de especies, más de 30.000, que se encuentran tanto en ambientes de agua dulce como salada. Son un grupo polifilético, en otras palabras, son especies que no tienen un antepasado en común, sino que comparten ciertos caracteres que fueron adquiridos de manera independiente como consecuencia de fenómenos evolutivos. Esto hace que exista una gran variedad de microalgas con características y particularidades fisiológicas diversas. Ade-

más, estos microorganismos suelen estar sometidos a cambios en su entorno (por ejemplo, cambios de salinidad, irradiación) por lo que han adquirido herramientas para adaptarse rápidamente a las nuevas circunstancias ambientales. Desde el punto de vista biotecnológico, esta plasticidad metabólica, cobra gran importancia para su aplicación en diferentes procesos industriales. Entre las ventajas que tienen estos microorganismos se encuentran: su capacidad de convertir energía solar en compuestos orgánicos, un ciclo de vida corto, la rápida duplicación de su biomasa, la capacidad de crecer en diferentes tipos de ambientes y de absorber y fijar CO₂, ayudando a reducir los niveles del gas de efecto invernadero. Asimismo, debido a algunas de estas características, es posible usar de tierras no cultivables para su crecimiento. A partir de la biomasa de microalgas se pueden extraer productos tales como carotenoides, vitaminas o ácidos grasos insaturados, que se utilizan en la fabricación de cosméticos, productos farmacéuticos, fertilizantes y suplementos nutritivos. Además, la biomasa de algas se puede aplicar industrialmente como fuente de energía para la producción de biocombustibles (biodiesel, bioetanol y biohidrógeno) y en el tratamiento de efluentes

Buscando microalgas en ambientes contaminados

Las microalgas representan un recurso con gran potencial. Todavía existen sitios y especies por explorar. Tal es así que, de todas las especies que existen, solo unas 200 han sido estudiadas y aproximadamente 20 se explotan comercialmente. Por lo que el campo de las aplicaciones de las microalgas en diferentes procesos industriales tiene aún mucho por desarrollar.



Imágenes: gentileza de la autora.



Figura 2. Imágenes de dos sitios muestreados. A la izquierda, humedal de la región de Pilcaniyeu. A la derecha, lago Nahuel Huapi.

DOSSIER

Imágenes: gentileza de la autora.

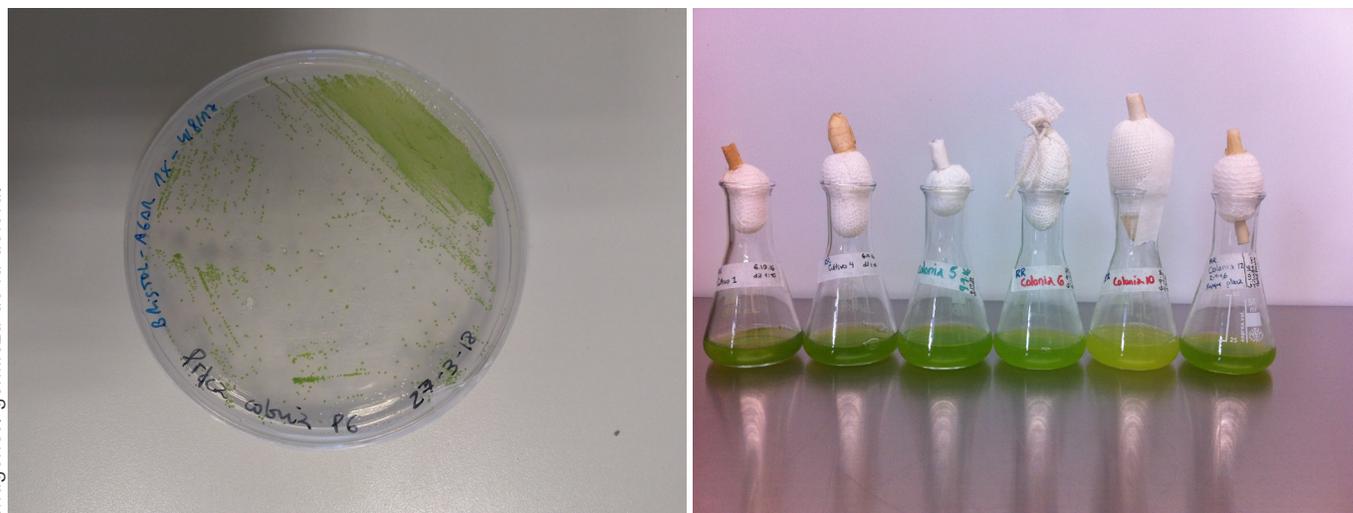


Figura 3. Imágenes de formas de cultivar microalgas. A: cultivos en una placa que muestran colonias individuales. B: cultivos en un medio líquido.

Uno de los objetivos del proyecto de investigación que llevo adelante es el aislamiento, identificación, caracterización y conservación de microalgas. Así, el Laboratorio de Bioenergía y Procesos de Biorremediación del Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable ubicado en el Centro Atómico Bariloche posee una colección de más de 35 cepas de algas, entre las que se han identificado variedades de interés biotecnológico (ver Figura 1). Nos resulta muy importante contar con una gran diversidad de cepas y conocer sus principales características ya que, para las aplicaciones biotecnológicas se necesita contar con especies que sean altamente productivas, en este caso es que tengan altas capacidades de remoción de metal y que, a su vez, tengan altas tasas de crecimiento en diferentes condiciones. Por lo que la selección de las cepas adecuadas constituye la primera fase que se debe tener en cuenta en cualquier desarrollo tecnológico.

Como primer paso para aislar las microalgas, se toman muestras de suelo y agua en la zona de interés. Hemos realizado estudios en sitios contaminados como el río Reconquista en la provincia de Buenos Aires y un humedal ubicado en la región de Pilcaniyeu, provincia de Río Negro (ver Figura 2) y también en sitios no contaminados con metales como los lagos Gutierrez y Nahuel Huapí (ver Figura 2). Para aislar las microalgas colocamos sedimento y/o agua en un medio de cultivo líquido (solución a base de agua y nutrientes minerales). Luego de unos siete días de incubación en luz, observamos que el medio se va poniendo verde, lo que indica crecimiento de microalgas. Un pequeño volumen de este cultivo líquido es sembrado en placas con un medio de cultivo sólido, de manera de permitir la formación de colonias indi-

viduales de microalgas (ver Figura 3A). Estas colonias son tomadas individualmente y se colocan nuevamente en un medio de cultivo líquido con el fin de obtener cultivos de una sola especie de alga (unialgales) y sin presencia de bacterias u hongos (axénicos) (ver Figura 3B). Esto se corrobora mediante observación al microscopio de los cultivos líquidos. A través de este proceso nuestro laboratorio fue construyendo su cepario de microalgas. Todos estos pasos los realizamos en un equipo (flujo laminar) que nos proporciona aire estéril para no contaminar las muestras con microorganismos ambientales o de nuestra propia piel. El crecimiento de las algas se realiza en incubadores que permiten que elijamos las condiciones de temperatura e intensidad y tiempo de luz. Además, mayormente, hacemos crecer los cultivos en agitación y si es necesario les agregamos aire, lo que hace que tengan una mayor cantidad de dióxido de carbono (CO_2).

¿Qué buscamos en las microalgas?

Una vez que contamos con los cultivos unialgales y axénicos continuamos con la identificación del género y, si es posible, su especie y nombre científico. Esto lo hacemos mediante la observación al microscopio, la utilización de claves de determinación y/ o mediante la utilización de técnicas de biología molecular, que incluyen la secuenciación de pequeñas regiones de ADN.

También realizamos una caracterización del tipo y velocidad de crecimiento, y tomamos nota de todas las particularidades que observamos durante el crecimiento del cultivo. Además, hacemos experimentos de remoción de metales. Para esto, ponemos en contacto a los cultivos de algas con el o los metales que que-

DOSSIER

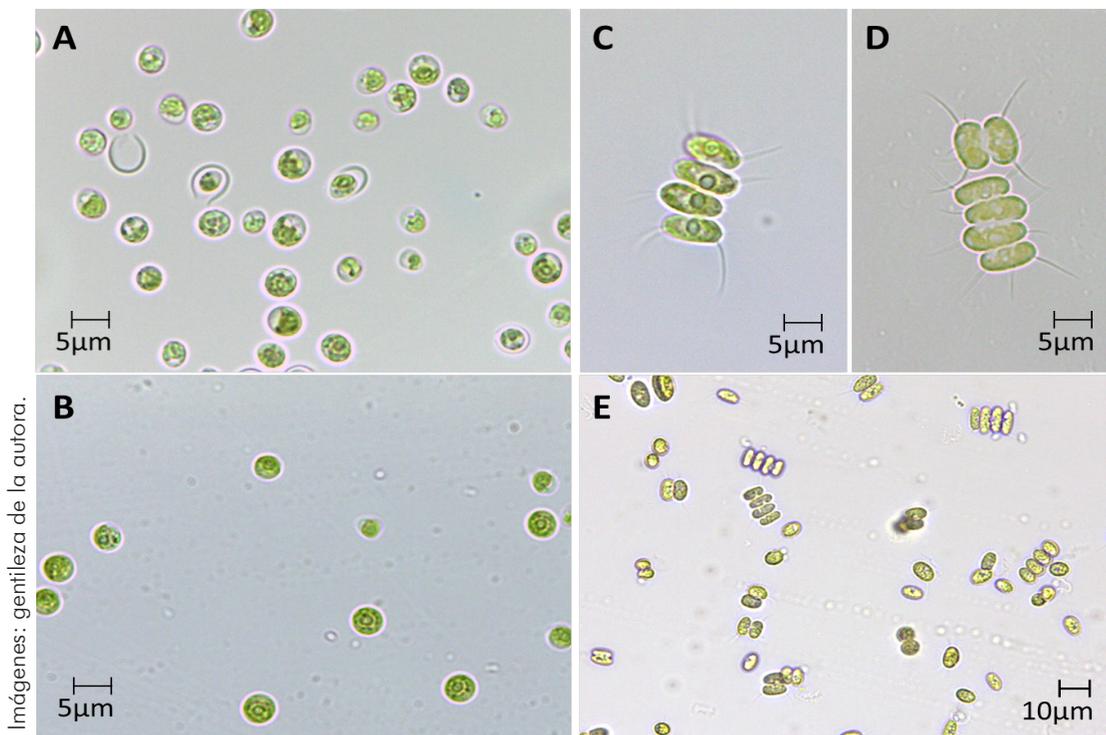


Figura 4. Fotografías representativas de microalgas de los géneros *Chlorella* sp., (A y B) y *Desmodesmus* sp. (C y E). Las imágenes se tomaron en un microscopio de campo claro con un aumento de 1000X para A hasta D y de 400X para E.

Imágenes: gentileza de la autora.

remos estudiar. Hemos trabajado con níquel, cromo, cobre y zinc. Transcurrido un tiempo, que va desde algunos minutos a las 72 horas o más, dependiendo del caso, separamos a la biomasa de algas del medio líquido y determinamos la concentración de metal remanente en este último. Así podemos hacer cálculos que nos permiten determinar la eficiencia y la capacidad de remoción de estas microalgas de cada metal. Estos datos nos permiten filtrar y seleccionar a las cepas con mejores rendimientos para realizar estudios y caracterizaciones más exhaustivas.

De esta manera hemos seleccionado dos cepas con un gran potencial para la biorremediación: una identificada como *Chlorella* sp. y la otra *Desmodesmus* sp. (ver Figura 4). Con estas algas hemos realizado ensayos de remoción de zinc, cobre y cromo, trabajando con cada metal por separado y también con todos juntos. Observamos que ambas cepas tuvieron muy buenas eficiencias de remoción, entre el 50 y el 75%, aun cuando todos los metales estaban presentes en simultáneo. Algo muy interesante fue encontrar que *Chlorella* sp. mostró una preferencia por cobre mientras que *Desmodesmus* sp. tuvo mayor afinidad por zinc. Esto demuestra la importancia de contar con un amplio cepario ya que, como dijimos anteriormente, cada especie tiene una composición particular de la pared celular y una respuesta específica a la presencia de metal. Entonces, de acuerdo a las características del efluente o agua contaminada a tratar, podemos determinar cuál de las cepas de algas conviene uti-

lizar. Nuestros últimos resultados muestran que en ciertos casos es muy útil emplear una combinación de diferentes cepas.

Continuando con el proceso

En pocas líneas, el proceso de biorremediación que proponemos es el siguiente: primero crecer las algas en un medio óptimo; luego usar la biomasa de algas para remover los metales, y por último separar a las algas con el metal unido a su superficie del agua o efluente limpio. Es interesante mencionar que es posible despegar el metal de las microalgas y así recuperarlo (se suele hacer si es un metal de alto costo). Además, también es posible proponer un uso posterior para la biomasa de algas, siempre teniendo en cuenta el confinamiento del metal.

Uno de los proyectos en los que trabajamos actualmente es el saneamiento de un humedal en la región de Pilcaniyeu. Un desafío que estamos abordando es el escalado del proceso, es decir salir de la escala de mesada (es decir, del laboratorio) en donde hacemos las primeras investigaciones y pasar a una etapa piloto que involucra mucho mayor volumen y nuevas variables para analizar y controlar.

Cosecha de microalgas

Otro desafío al que nos enfrentamos es a la separación de la biomasa. La cosecha de las microalgas requiere la concentración de suspensiones celulares diluidas. Una de las limitaciones para la aplicación in-

DOSSIER

dustrial de las microalgas está asociada a los costos de la cosecha de las mismas. En la actualidad, se necesita que las tecnologías de cosecha sean más eficientes y económicas para mejorar la viabilidad comercial de la biotecnología de microalgas. En este sentido, nuestro grupo de trabajo viene abordando la cosecha magnética utilizando nanopartículas paramagnéticas (ver Glosario) de bajo costo. Nuestro grupo de trabajo fue pionero en analizar y demostrar la compatibilidad de los procesos de biorremediación de metal y cosecha magnética, obteniendo una eficiencia de cosecha mayor al 94%. La implementación de este proceso tiene un doble beneficio porque además de reducir los costos utiliza material de origen natural que no contamina el ambiente.

Los pasos a seguir

Creemos que nuestras tareas de investigación, desarrollo e innovación podrían proporcionar una solución menos costosa y más amigable con el ambiente para la remediación de metales. Sin embargo, a pesar de los resultados satisfactorios que hemos conseguido, todavía debemos enfrentarnos a desafíos como el cambio de escala, el desarrollo de los sistemas de cultivo y la separación de la biomasa. El desarrollo de esta aplicación biotecnológica es uno de nuestros principales objetivos. Consideramos que es muy importante trabajar en procesos que puedan ser transferidos a empresas, cooperativas y organismos gubernamentales con el fin de dar solución a diferentes necesidades de nuestra comunidad.

Resumen

Durante las últimas décadas, la contaminación ambiental con metales ha aumentado considerablemente. Los metales son considerados unos de los contaminantes más peligrosos debido a su alta toxicidad y a que son no biodegradables. La biorremediación de metales por microalgas se vuelve muy competitiva para el tratamiento de grandes volúmenes de efluentes conteniendo baja concentración de metales (1 a 100 mg/mL). Particularmente, las algas autóctonas de sitios contaminados tienen mejores eficiencias para remover los metales del agua. En este trabajo contamos el proyecto de biorremediación que desarrollamos utilizando algas aisladas de sitios contaminados y que aún no han sido estudiadas.

Glosario

Biodisponibilidad: se refiere a la concentración o grado en la que un elemento o compuesto se encuentra disponible para interactuar con los organismos vivos. La biodisponibilidad se encuentra íntimamente relacionada con las condiciones fisicoquímicas del ambiente, que determinan la especiación y por lo tanto la concentración de metal libre.

Catión: Átomo o molécula con carga neta positiva.

Nanopartículas paramagnéticas: partículas de tamaño pequeño, menor a un micrómetro, que responden a variaciones en el campo magnético.

Intercambio iónico: proceso químico en el cual los iones disueltos en el agua se intercambian por otros iones con una carga similar.

Precipitación química: proceso químico en el cual se obtiene un sólido a partir de una solución.

Para ampliar este tema

Hernández-Pérez, A. y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2): 157-173.

El cultivo de microalgas. En: <https://agrotendencia.tv/agropedia/el-cultivo-de-microalgas/>

Caviedes Rubio, D., Muñoz Calderón, R., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D. y Sandoval Rojas J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. *Ingeniería y Región*, 13: 73-90.

Ferraro, G., Toranzo, R., Bagnato, C., Gómez Jousse, M., Areco, M., Bohe, A., Bagnarol, D., Pasquevich and D., Curutchet, G. (2021). Native *Desmodesmus* sp. and *Chlorella* sp. isolated from the Reconquista River display different binding preference for Cu(II) and Zn(II). *Journal of Environmental Management*, 293, 112895.

-Ferraro, G., Toranzo, R., Castiglioni, D., Lima Jr, E., Vasquez Mansilla, M., Fellenz, N., Zysler, R. and Pasquevich, D. (2018). Zinc removal by *Chlorella* sp. biomass and harvesting with low cost magnetic particles. *Algal Research*, 33: 266-276.