

# 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 Prados<sup>1</sup>**

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

<sup>1</sup>Instituto 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

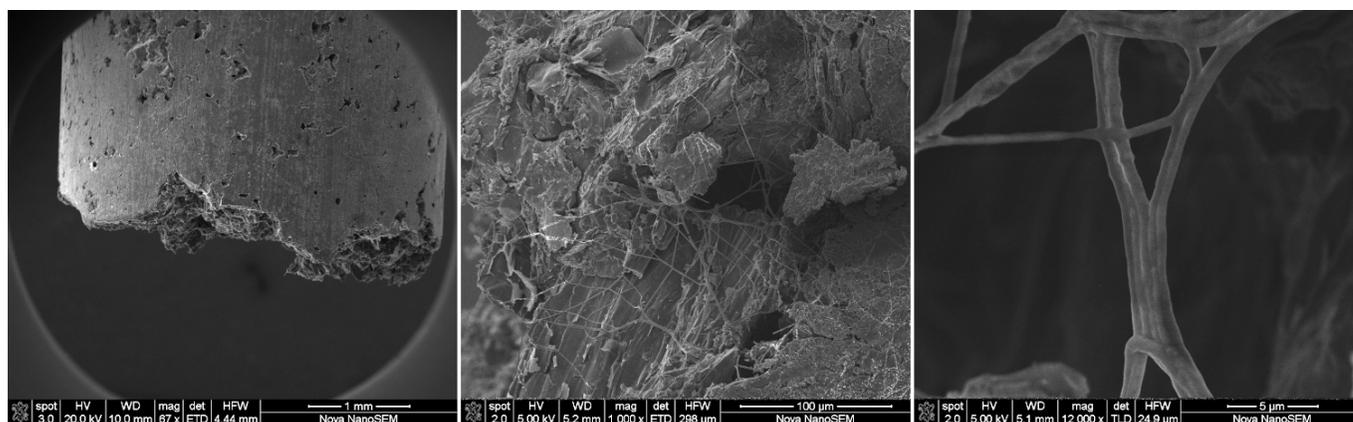


Imagen: gentileza de la autora.

**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 bio-combustibles 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.

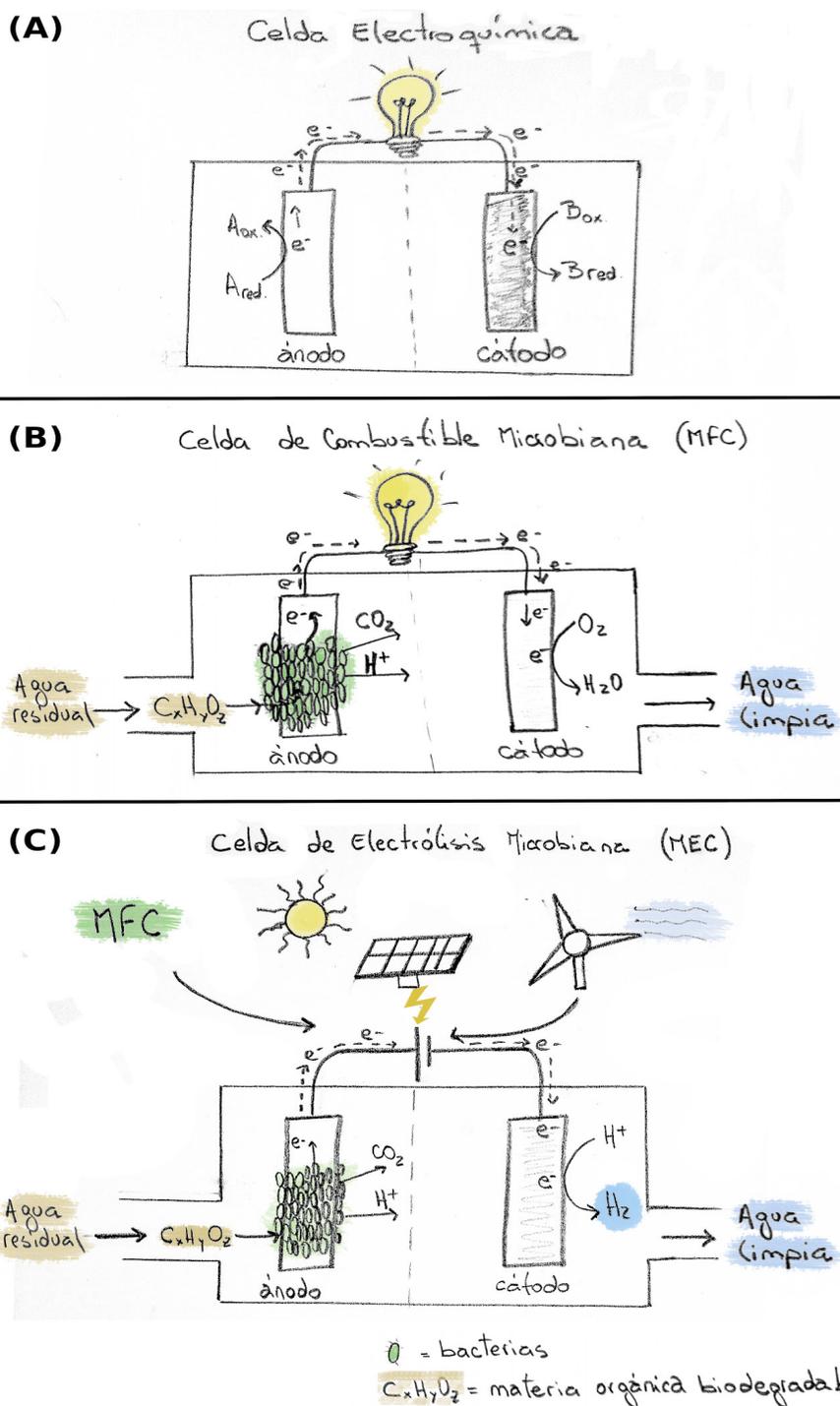
Actualmente, los mecanismos empleados por las

# 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.

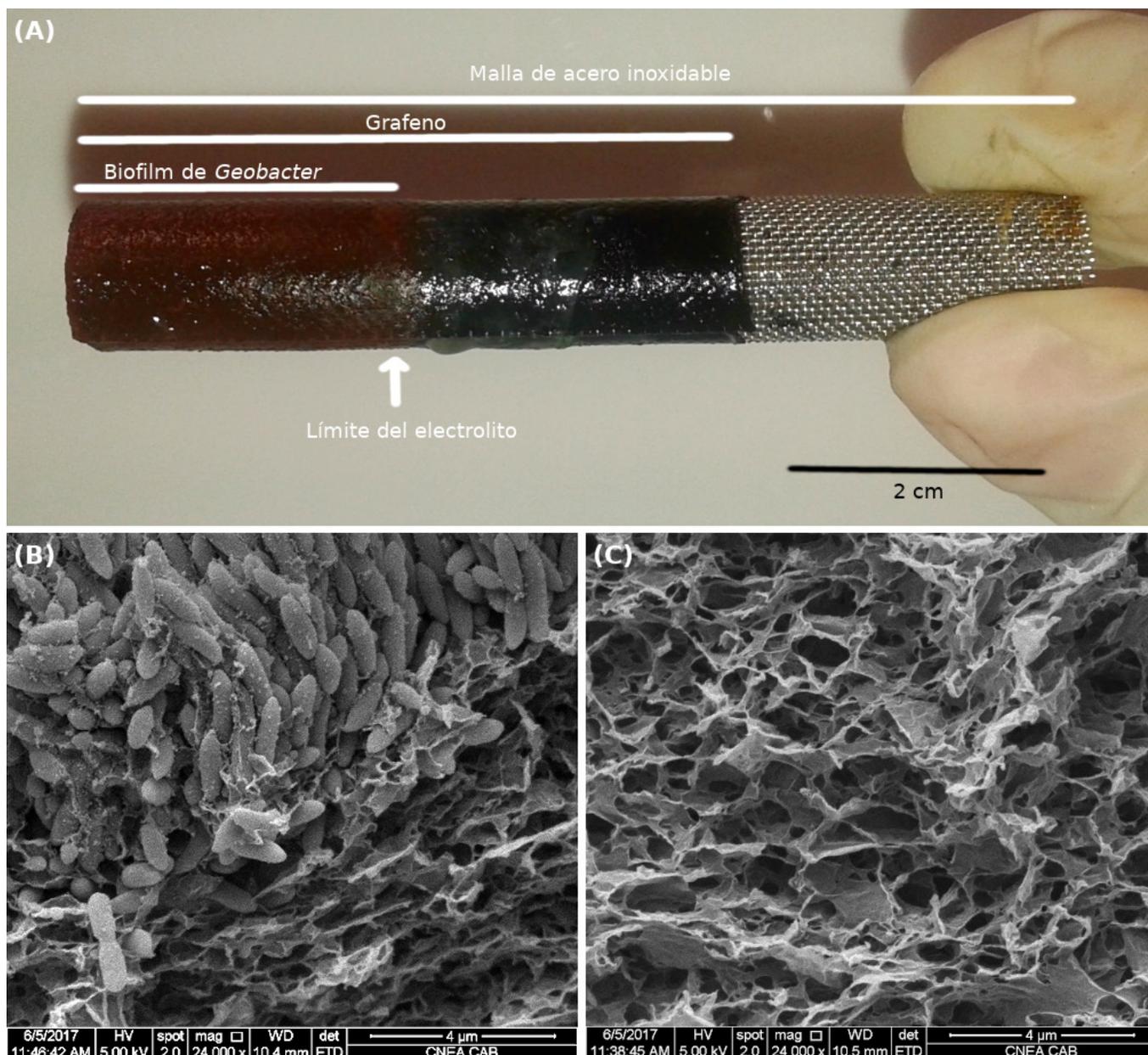
Además de la producción de hidrógeno, los electrones derivados del metabolismo microbiano pueden aprovecharse para sintetizar otros compuestos de interés a partir de aguas residuales (dador de electrones) y dióxido de carbono (aceptor de electrones), como piruvato y butano. A estas celdas se las conoce 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 ( $\text{Cr}^{6+}$ ) y uranio ( $\text{U}^{6+}$ ). 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



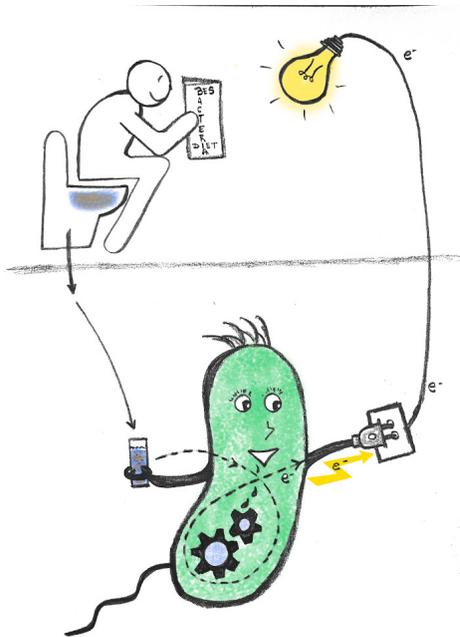
**Figura 3. Electrodo a base de hidrogel de grafeno al final de la operación de una MEC. (A) El hidrogel de grafeno (gel negro de la superficie indicada) se autoensambló sobre una malla de acero inoxidable. Este electrodo se empleó como ánodo en un BES, inoculado con un cultivo puro de la bacteria electroactiva *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>