



El BIOHIDRÓGENO: la fuente de energía del futuro

Ángela Ku González y Enrique Castaño de la Serna

En la actualidad la población ve cómo se acaban lentamente las fuentes de petróleo, el mayor generador de energía, y también puede palpar el declive ecológico que las sociedades modernas han ocasionado. Esto genera temor, pero también despierta nuestra conciencia ambiental.

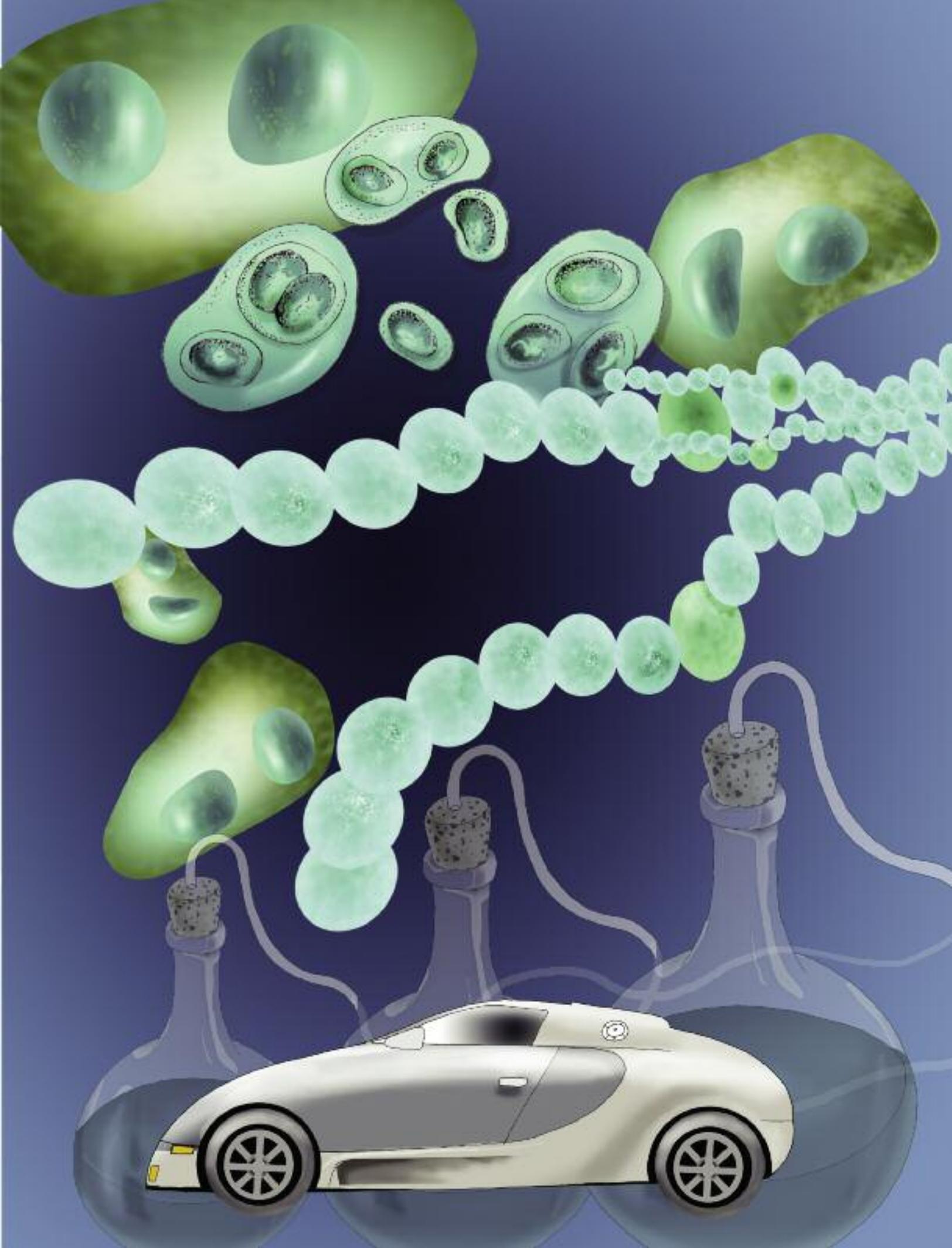
¿Cuál será el futuro? La búsqueda de fuentes alternas de energía ha vuelto a tomar vigor en los últimos años. Algunas fuentes ya olvidadas, como el bioetanol o el biodiesel, comienzan a tomar fuerza después de cien años de abandono. Pero, sobre todo, nuestra demanda energética exige fuentes de energía alternas que no compitan con la demanda alimentaria y que no utilicen extensiones territoriales destinadas a la agricultura. Asimismo, la reciente conciencia ecológica requiere de fuentes de energía que no causen estragos ambientales en el futuro, como la emisión de gases de efecto invernadero. Una solución en un futuro cercano es el hidrógeno, gas que cuando es producido a partir de un sistema biológico se denomina *biohidrógeno*.

El hidrógeno es el compuesto más abundante en el Universo. Cuando interactúa con el oxígeno para formar agua, libera una gran cantidad de energía. El producto resultante de esta reacción es agua pura, que puede ser reutilizada para volver a producir hidrógeno y oxígeno. Para lograr esto se requiere de un sistema que permita romper la molécula de agua para obtener estos gases, al igual que un sistema que permita utilizar los iones de hidrógeno (H^+) para producir gas hidrógeno (H_2).

Existen diversos métodos para su obtención, incluyendo procesos de alta presión con electrólisis de agua, procesos fotoelectroquímicos y procesos termoquímicos (los cuales se asocian frecuentemente con el enfriamiento de reactores nucleares), pero uno de los más interesantes es el uso de organismos que realicen el proceso de forma natural.

En realidad este proceso lo realizan diariamente las plantas y algas utilizando la energía solar y los sistemas enzimáticos de sus células, donde el agua y el dióxido de carbono se combinan gracias a la energía solar para producir azúcares. En los sistemas de bioetanol se emplean estos azúcares para producir alcoholes; en los sistemas de biodiesel se requiere de un mayor procesamiento bioquímico para que las plantas generen aceites que puedan utilizarse posteriormente para producir diesel.

Es claro que cada proceso involucra una pérdida de energía. Por ello, la eficiencia resultante del proceso decae con el número de conversiones moleculares. La mayor eficiencia claramente recae sobre el proceso primario. Algunas algas, como las cianobacterias, se han utilizado durante los últimos años para lograr la producción de hidrógeno. Las cianobacterias son un grupo grande y diverso de organismos procariontes que en muchos casos tienen la habilidad de producir hidrógeno. Por lo menos 14 géneros de cianobacterias producen este gas bajo diversas condiciones de cultivo. Entre éstas destacan la cianobacteria *Gloeocapsa alpicola*, que bajo deficiencias de azufre muestra un incremento



La conversión de agua en hidrógeno y oxígeno requiere de enzimas; en particular, nitrogenasas o hidrogenasas

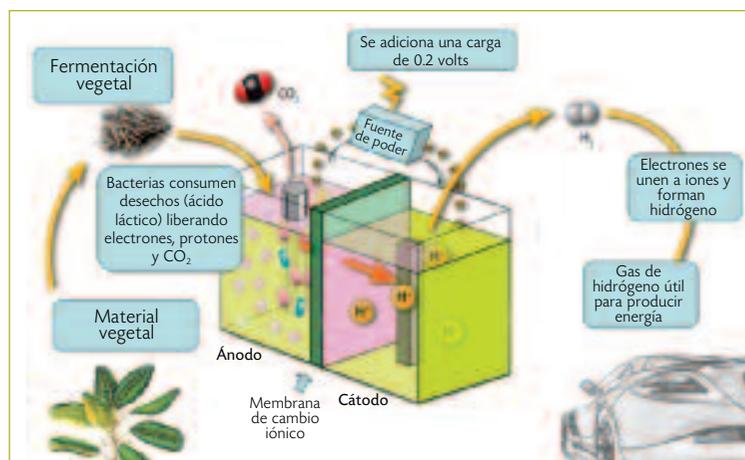
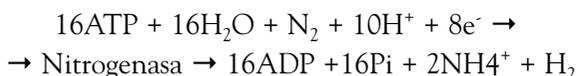


Figura 1.

en la producción de hidrógeno; *Arthrospira* (*Spirulina platensis*) puede producir hidrógeno en la oscuridad y en condiciones anaeróbicas; y la cianobacteria *Anabaena cylindrica* produce hidrógeno y oxígeno simultáneamente en una atmósfera de argón por 30 días, con luz limitada. Las cianobacterias simbióticas con las raíces de *Cycas revolute* y *Zamia furfuracea* muestran una gran cantidad de producción de hidrógeno. Entre ellas destaca *Anabaena cylindrica*, que produce la mayor cantidad de hidrógeno (30 mililitros de H₂ por litro de cultivo por hora).

La conversión de agua en hidrógeno y oxígeno requiere de enzimas; en particular, nitrogenasas o hidrogenasas. Las nitrogenasas se encuentran en los quistes filamentosos de las cianobacterias cuando crecen en condiciones limitantes de nitrógeno. El hidrógeno es producido como un subproducto en la fijación de nitrógeno a amoníaco. La reacción consume ATP (trifosfato de adenosina), molécula que almacena energía química, que en forma general sigue esta ecuación:



Las hidrogenasas existen en dos tipos diferentes de cianobacterias. Una de ellas tiene la habilidad de oxidar el hidrógeno (gracias a una enzima codificada por el gen *hupSL*) y la otra posee una hidrogenasa bidireccional (codificada por el gen *hoxFUYH*) que puede consumir o producir hidrógeno. Las hidrogenasas que consumen hidrógeno se encuentran en los tilacoi-

des membranales (sacos aplanados o vesículas) de los quistes formados por cianobacterias filamentosas. Es ahí donde se transfieren los electrones procedentes del hidrógeno para reducir el oxígeno por la vía respiratoria, y la reacción es conocida como oxihidrogenación o reacción de Knallgas.



El papel de las hidrogenasas bidireccionales es poco claro, y se cree que mantiene el nivel iónico del organismo. Por lo general se asocian a la membrana del citoplasma, y es posible que tengan funciones similares a las de aceptores de electrones, tanto de NADH como de hidrógeno. Son enzimas que constan de cuatro o cinco subunidades proteicas, dependiendo de la especie; el gen *hoxYH* es el principal, y se requiere de proteínas auxiliares conocidas con el término *hyp*, producto de los genes *hypA* a *F*. Este tipo de hidrogenasas puede ser de utilidad para la producción futura de hidrógeno.

Uno de los problemas principales es que la producción de hidrógeno mediante nitrogenasas o hidrogenasas puede darse sólo en condiciones anaeróbicas, debido a que son altamente sensibles al oxígeno. Puesto que el oxígeno es uno de los productos de la fotosíntesis, los organismos han desarrollado un sistema espacial y temporal estratégico para proteger las enzimas de ser inactivadas por oxígeno. Esto incluye: a) quistes que contienen cámaras separadas que evitan que el oxígeno producido afecte la actividad de las nitrogenasas, utilizando membranas permeables al oxígeno; y

b) la realización del proceso en periodos diferentes de luz y oscuridad.

En la actualidad se han tratado de reproducir celdas que mimeticen los procesos fotosintéticos para la producción de hidrógeno a partir de agua. El prototipo existente fue construido por Thomas Mallouk, de la Universidad de Pensilvania. Denominado como celda Grätzel, utiliza la luz para liberar los electrones de una molécula de colorante (pigmentos naturales), pero en lugar de ser utilizada para generar corriente, la celda Grätzel lleva los electrones hacia la catálisis de la reacción, que a partir del agua produce oxígeno e hidrógeno en una reacción similar a la de la fotosíntesis.

Sin embargo, el proceso para reproducir eficientemente estas reacciones es difícil, ya que muchos de los colorantes probados reaccionan fácilmente con sus moléculas antes de llevar a cabo la catálisis. Una vez generados los compuestos, se tendrá que generar módulos a nivel de nanotecnología para acomodar de manera eficiente las moléculas de colorante y evitar cortocircuitos. Otro problema a solucionar es la composición química de la molécula de tinción, que por lo general está basada en rutenio u óxido de iridio, lo cual puede causar el problema. Se tendrá que probar si se puede recapitular el proceso utilizando compuestos de mayor abundancia, como lo hacen los sistemas biológicos; sin embargo, estos sistemas ya tienen una eficiencia del uno por ciento de conversión energética. Es posible que con la optimización geométrica de las moléculas de iridio se pueda lograr un 10 por ciento de eficiencia; de ser así, se podrían utilizar estas celdas para la producción masiva del hidrógeno usando luz solar, convirtiéndola en una fuente de energía atractiva y no contaminante.

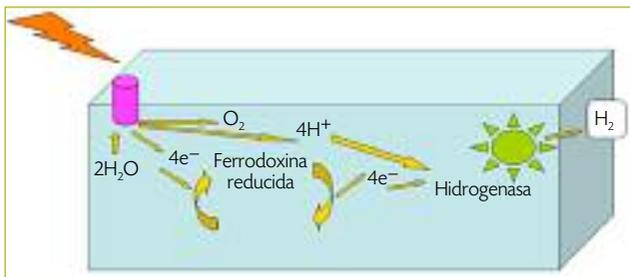


Figura 2.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, registro 58636.

Ángela Ku González es química industrial por la Universidad Autónoma de Yucatán. Ha trabajado en el área de bioquímica y biología molecular, y es especialista en microscopía electrónica de barrido. Actualmente es estudiante de la maestría en energías renovables del CICY. Su área de interés es la clonación de una hidrogenasa tolerante al oxígeno.

angela@cicy.mx

Enrique Castaño de la Serna es biólogo egresado de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Estudió la maestría en Biofísica y el doctorado en Bioquímica y Biofísica en la Universidad de Rochester, Estados Unidos. Ha realizado dos posdoctorados en la Universidad de Harvard y en el Instituto Marie Curie. Actualmente es investigador del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y está interesado en entender el mecanismo de regulación genética, al igual que los procesos bioenergéticos para la producción de celdas bio-Grätzel mediante hidrogenasas.

enriquec@cicy.mx

Lecturas recomendadas

- Clauwaert, P., S. Mulenga, P. Aelterman y W. Verstraete (2009), "Litre-scale microbial fuel cells operated in a complete loop", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 83(2): 241-247.
- Dinamarca, C. y R. Bakke (2009), "Apparent hydrogen consumption in acid reactors: observations and implications", *Water Sci. Technol.*, 59 (7):1441-1447.
- Doebbe, A., J. Rupprecht, J. Beckmann, J. H. Mussgnug, A. Hallmann, B. Hankamer y O. Kruse (2007), "Functional integration of the HUP1 hexose symporter gene into the genome of *C. reinhardtii*: impacts on biological H₂ production", *O. J. Biotechnol.*, 131(1):27-33.
- Hankamer, B., F. Lehr, J. Rupprecht, J. H. Mussgnug, C. Posten y O. Kruse (2007), "Photosynthetic biomass and H₂ production by green algae: from bioengineering to bioreactor scale-up", *Physiol. Plant.*, 131(1):10-21.
- Peiris, B. R., P. G. Rathnasiri, J. E. Johansen, A. Kuhn y R. Bakke (2006), "ADM1 simulations of hydrogen production", *Water Sci. Technol.*, 53(8):129-137.