

Revista de
divulgación
científica

iBIO

Biotecnología a la vanguardia

Avances en
biotecnología

Revista de divulgación científica iBIO, Año 5, No. 3, noviembre 2023 - febrero 2024, es una publicación electrónica cuatrimestral. Insurgentes norte 1260 509, Capultitlán, Gustavo A. Madero CP:07370, Ciudad de México, México. Página electrónica de la revista: www.revistaibio.com y dirección electrónica: jessica.sanchezvarg@gmail.com. Editor responsable: Jessica Sánchez Vargas. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título: 04-2023-010910182600-102. ISSN: 2954-4890. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: M. en B. Jessica Sánchez Vargas. Fecha de última modificación: 27 de octubre de 2023. Tamaño del archivo: 25.4 MB. Los artículos y su contenido son responsabilidad exclusiva de sus autores. Se permite la reproducción total o parcial del contenido con fines de divulgación, otorgando el debido crédito a los autores. Queda prohibida cualquier forma de comercialización del contenido.



<http://revistaibio.com/>



[/revista.ibio](https://www.facebook.com/revista.ibio)



[ibio.revista](https://www.instagram.com/ibio.revista)

Directorio

Editor en jefe

Jessica Sánchez Vargas
Isauro Guzmán Cortez

Comité editorial

Gpe. Tonantzin de Dios Figueroa
Jesús Torres Rizo
Francisco J. Valdés Parada

Editores de sección

Olga B. Benítez López
Isauro Guzman Cortez
Ana Paulina Gómez Flores
Gpe. Tonantzin de Dios Figueroa
Jesús Torres Rizo









Galerado

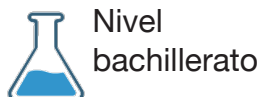
Jessica Sánchez Vargas
Francisco J. Valdés Parada

Redes sociales

Bryan A. Polito Palma
Saira Reyes Diego
Daniela Pérez Chamorro

Contenido

Artículo	Pag.	Dificultad de la lectura
<p>Hot Science La biotecnología y la química orgánica hacen click: Química bioortogonal y la reacción SPAAC. <i>Julio César Flores-Reyes, Eduardo González-Zamora</i></p>	4	
<p>La desnitrificación en los humedales construidos. <i>Georgina Martínez-Reséndiz, Brenda Lizeth Monzón Reyes, Luis Carlos Sandoval Herazo</i></p>	9	
<p>Las Electro-poderosas: Bacterias creadoras de electricidad. <i>Marcela Méndez-Tovar, Ma. Concepción Romero-Serrano</i></p>	15	
<p>La cerveza de maíz. <i>Miguel Ángel Hernández-Carapia, José Ramón Verde-Calvo, Héctor Bernardo Escalona-Buendía</i></p>	21	
<p>Hongos comestibles: fuente de compuestos bioactivos. <i>Hypatia Arano Varela, César Díaz Talamantes</i></p>	27	
<p>Optimizando la protección solar con <i>Anabaena variabilis</i>: Micosporinas como una alternativa de filtro solar. <i>Daniela Fernanda Suárez-Bernal, Paula Marroquín-Morales, Samantha Carrillo-Rosas, Claudia Caballero-Cerón</i></p>	34	
<p>Concientifica ¡UN ARCOÍRIS VEGETAL!: Alimentos coloridos que impactan en tu salud. <i>Elsa Díaz-Montes</i></p>	41	
<p>Microbichos Inóculos fermentativos: ¿De qué sabor vas a querer tu chocolate? <i>Dulce del Carmen Velásquez Reyes, Manuel R. Kirchmayr, Anne Gschaedler Mathis</i></p>	46	



Hot science



Chemistry

eighth edition



La biotecnología y la química orgánica hacen click

Química bioortogonal y la reacción SPAAC

Julio César Flores-Reyes
Eduardo González-Zamora*

Departamento de Química, Universidad
Autónoma Metropolitana Unidad
Iztapalapa.

*Autor para la correspondencia:
egz@xanum.uam.mx

Resumen

La bioconjugación es una técnica empleada para monitorear eventos celulares mediante la modificación química de biomoléculas. Esta modificación no debe interferir con los procesos que ocurren dentro de la célula, es decir, debe ser bioortogonal. Una de las reacciones químicas que ha emergido para la bioconjugación es la reacción click entre azidas y ciclooctinos para producir un triazol. El uso de esta reacción ha permitido el estudio de procesos bioquímicos *in vivo* mediante técnicas de microscopía.

Palabras clave: química click, bioconjugación, química bioortogonal.

La modificación química de biomoléculas, o bioconjugación, se ha utilizado desde hace alrededor de 100 años para monitorear eventos celulares, por ejemplo, determinar la actividad enzimática y observar biomarcadores mediante técnicas de microscopía, entre otros. Las proteínas han sido las biomoléculas más estudiadas mediante técnicas de bioconjugación debido al interés en su diversa actividad biológica, y a que están formadas por grandes cadenas de aminoácidos cuyos grupos funcionales pueden utilizarse para realizar modificaciones estructurales mediante reacciones químicas.

Cuando se realizan técnicas de bioconjugación, la elección de las especies químicas que van a participar es de suma importancia ya que para el estudio de cualquier sistema lo mejor es que la perturbación sea mínima. Es aquí donde entra en juego un concepto impor-

tante conocido como química bioortogonal, el cual se refiere a las reacciones químicas que se pueden realizar dentro un sistema biológico sin que interfieran con los procesos bioquímicos, es decir, la química bioortogonal permite el estudio de la estructura y función de las biomoléculas en su ambiente nativo. Para que esto sea posible, las reacciones deben ser rápidas, altamente selectivas y tolerantes a las condiciones biológicas. Esto representa un gran desafío para los químicos orgánicos ya que están acostumbrados a trabajar bajo condiciones extremas en comparación con las condiciones biológicas. Por ejemplo, en un laboratorio de química orgánica es común realizar algunas reacciones a temperaturas tan bajas como $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, bajo atmósfera de gas inerte, con disolventes libres de agua y pH altamente ácido o básico, lo cual contrasta con las condiciones biológicas donde el pH debe ser cercano a neutro, la atmósfera puede contener oxígeno, el medio es acuoso y la temperatura debe estar entre $4\text{ y }37\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

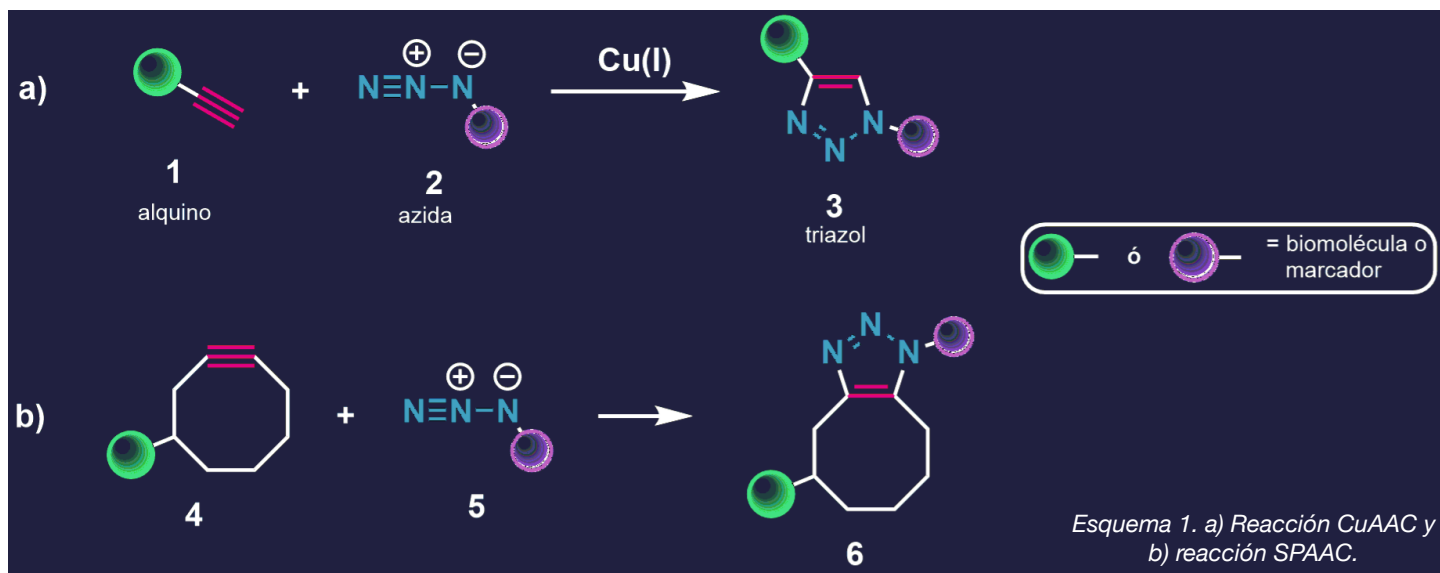
Existen muchas reacciones químicas que se han utilizado para la bioconjugación y continuamente se siguen investigando nuevas reacciones altamente específicas para este fin. Una reacción que se ha popularizado durante los últimos años es la cicloadición catalizada por cobre entre azidas orgánicas y alquinos terminales para formar triazoles, mejor conocida como la reacción click (o CuAAC, por sus siglas en inglés) (Esquema 1 a)). Es importan-

te mencionar que hay muchas reacciones que pertenecen a la química click, y esta se refiere a aquellas reacciones que ocurren fácilmente en un único paso, en general son poco sensibles a las condiciones de reacción y generan irreversiblemente un único producto con alto rendimiento y especificidad. Pensemos en el click que se escucha al abrochar ambos extremos de un cinturón de seguridad para entender por qué se le llamó así a este tipo de reacciones. Entonces, si bien hay muchas reacciones que pertenecen a la química click, la cicloadición de azidas y alquinos es conocida como “la” reacción click prototípica ya que cumple con todas las características mencionadas sobre la química click [2].

Con lo ya mencionado podría pensarse que la reacción click es una candidata ideal para utilizarse para bioconjugación, excepto que para lograr velocidades de reacción aceptables requiere ser catalizada por una fuente de cobre(I) y este es tóxico para muchas de las células microbianas y mamíferas, además de que puede ser desactivado por ligandos con afinidad al cobre que pueden encontrarse dentro de la célula. Aunque es posible realizar esta reacción sin la catálisis, se requieren condiciones que no son compatibles con sistemas biológicos, además de que se pierde la especificidad de la reacción ya que se pueden formar dos isómeros con una conectividad diferente, por lo que prescindir del cobre deja de ser una opción viable.

Para superar este obstáculo se empleó una variante poco conocida de esta reacción en la que el alquino está instalado en un ciclooctino (un anillo de ocho miembros). Un alquino consiste de un enlace triple entre dos átomos de carbono, lo que le confiere una gran rigidez. Sin embargo, cuando se encuentra dentro del ciclooctino este enlace se deforma y se vuelve muy tenso porque no se encuentra en su geometría natural. Esta enorme tensión hace que el alquino sea mucho más reactivo y provee la fuerza motriz necesaria para llevar a cabo la reacción click sin necesidad de catalizadores. A esta reacción se le conoce como cicloadición azida-alquino promovida por tensión o SPAAC por sus siglas en inglés (Esquema 1 b)). Aún con este desarrollo la reacción SPAAC era considerablemente más lenta que la reacción CuAAC, por lo que fue necesario realizar modificaciones al ciclooctino para incrementar la velocidad de reacción. Estas modificaciones consistieron en introducir grupos funcionales que aumentaran aún más la reactividad del alquino para finalmente lograr velocidades de reacción que fueran comparables con las de la CuAAC, y que, de esta forma, la reacción SPAAC se convirtiera en una verdadera reacción click sin la necesidad de la catálisis con cobre [3].

¿Cómo pueden introducirse estos grupos funcionales a una biomolécula? Y ¿qué es más conveniente introducir, la azida o el ciclooctino? En general se prefiere la introducción de



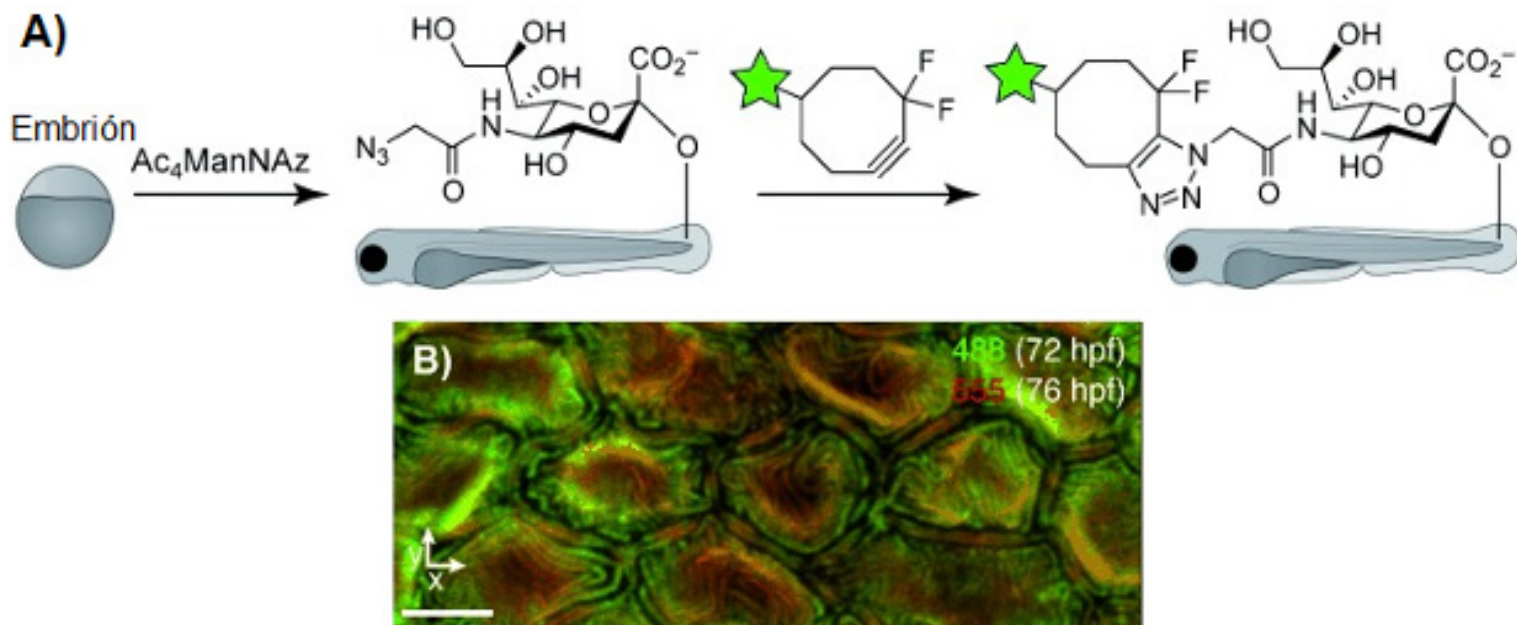


Figura 1. A) Esquema general del etiquetado fluorescente de embriones de pez cebra. B) Fluorescencia en una capa de células en la región ventral de la mandíbula de un embrión de pez cebra, observada tras la reacción SPAAC. Imagen modificada tomada de [5].



Figura 2. De izquierda a derecha: Carolyn R. Bertozzi, Morten Meldal y Karl Barry Sharpless. Imagen tomada de <https://cen.acs.org/people/nobel-prize/Click-bioorthogonal-chemistry-win-2022-Nobel-Prize-in-Chemistry/100/i36>

la azida ya que es un grupo funcional pequeño, inerte y no tóxico para las biomoléculas. Su introducción puede realizarse por métodos enzimáticos, por codificación genética o por bioconjugación, que es el método más simple y directo. Las azidas se derivan de las aminas y, por lo tanto, los aminoácidos de una proteína (generalmente cisteína y lisina) se pueden modificar para introducir este grupo funcional. La

introducción del ciclooctino supone una dificultad mayor ya que es un fragmento voluminoso y su síntesis es compleja, por lo que no pueden utilizarse las mismas estrategias que para las azidas. Sin embargo, esto si se ha logrado, y conlleva la ventaja de que la azida puede utilizarse para funcionalizar con mayor facilidad muchos tipos distintos de moléculas, por ejemplo, compuestos fluorescentes o para teñir organelos [4].

Un ejemplo importante de la utilidad de la reacción SPAAC para el estudio de organismos in vivo fue publicado en 2012 por un grupo de investigadores liderado por Carolyn R. Bertozzi [5]. En este trabajo estudiaron el sialoma de embriones de pez cebra mediante el etiquetado fluorescente de fragmentos de ácidos siálicos (una clase de monosacáridos) presentes en glicoproteínas y glicolípidos que se encuentran en la superficie celular (Figura 1). El sialoma está presente en todas las células de los organismos vertebrados, y se refiere a la totalidad de biomoléculas, organelos y células que contienen fragmentos de ácidos siálicos; estos compuestos cumplen con funciones de comunicación intrínseca y extrínseca entre células, así como de defensa. En este caso, la azida se introdujo metabólicamente cultivando los embriones de pez cebra en presencia de *N*-azidoacetilmanosamina (Ac4ManNAz), la cual actúa como un precursor biosintético del ácido azido siálico, que es incorporado a los polisacáridos de la superficie celular. Después, los embriones se hicieron reaccionar con un ciclooctino conjugado con un marcador fluorescente, lo cual permitió su visualización mediante microscopía confocal. Este etiquetado fluorescente permitió observar la formación y localización de nuevas zonas que contienen células con polisacáridos en su superficie y monitorearlos durante el desarrollo de los embriones [5].

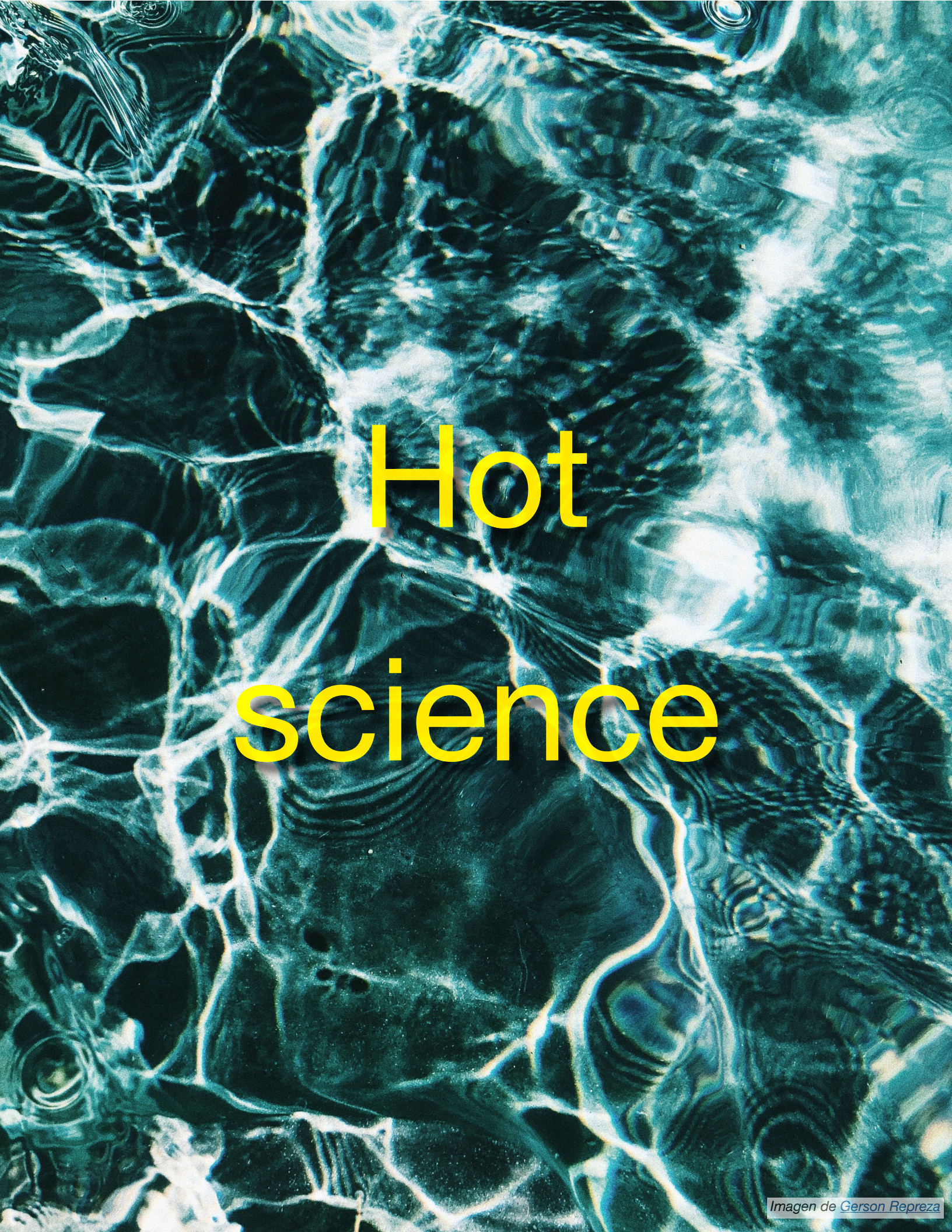
En conclusión, la reacción SPAAC es una variante de la reacción CuAAC que no necesita de catalizadores de cobre, sino que ocurre debido a la alta tensión de anillo que proviene de la presencia del alquino en un ciclooctino. Lo anterior, junto con las características de la reacción click (alta velocidad y especificidad, tolerancia a diferentes condiciones de reacción) ha permitido que pueda ser utilizada para la bioconjugación, que es la modificación de biomoléculas mediante reacciones químicas. Esto se utiliza para poder estudiar y monitorear procesos que ocurren dentro de células y organismos vivos sin interferir con ellos, a lo que se le ha llamado como química bioortogonal.

Si este tema le pareció mínimamente co-

nocido quizás es porque en 2022 el premio Nobel de química fue otorgado en conjunto a Carolyn R. Bertozzi, quien desarrolló el concepto de química bioortogonal y la reacción click sin catálisis de cobre, y a Morten Meldal [6a] y Karl Barry Sharpless, [6b] por sus contribuciones independientes al desarrollo de la reacción click catalizada por cobre (Figura 2). **iBIO**

Referencias

- [1] Stephanopoulos, N., & Francis, M. B. (2011). Choosing an effective protein bioconjugation strategy. *Nature Chemical Biology*, 7(12), 876-884. <https://doi.org/10.1038/nchembio.720>
- [2] Sletten, E. M., & Bertozzi, C. R. (2009). Bioorthogonal Chemistry: Fishing for Selectivity in a Sea of Functionality. *Angewandte Chemie*, 48(38), 6974-6998. <https://doi.org/10.1002/anie.200900942>
- [3] Agard, N. J., Prescher, J. A., & Bertozzi, C. R. (2004). A Strain-Promoted [3 + 2] Azide-Alkyne Cycloaddition for Covalent Modification of Biomolecules in Living Systems. *Journal of the American Chemical Society*, 126(46), 15046-15047. <https://doi.org/10.1021/ja044996f>
- [4] Van Hest, J. C. M., & Van Delft, F. L. (2011). Protein Modification by Strain-Promoted Alkyne-Azide Cycloaddition. *ChemBioChem*, 12, 1309-1312. <https://doi.org/10.1002/cbic.201100206>
- [5] Dehnert, K., Baskin, J., Laughlin, S., Beahm, B., Naidu, N., Amacher, S., & Bertozzi, C. (2012). Imaging the sialome during zebrafish development with copper-free click chemistry. *ChemBioChem*, 13, 353-357. <https://doi.org/10.1002/cbic.201100649>
- [6a] Tornøe, C. W., Christensen, C., Meldal, M. (2002). Peptidotriazoles on Solid Phase: [1,2,3]-Triazoles by Regioselective Copper(I)-Catalyzed 1,3-Dipolar Cycloadditions of Terminal Alkynes to Azides. *Journal of Organic Chemistry*, 67(9), 3057-3064. <https://doi.org/10.1021/jo011148j>
- [6b] Rostovtsev, V., Green, L., Fokin, V., Sharpless, K. B., (2002). A Stepwise Huisgen Cycloaddition Process: Copper(I)-Catalyzed Regioselective "Ligation" of Azides and Terminal Alkynes. *Angewandte Chemie International Edition*, 41(14), 2596-2599. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020715\)41:14<2596::AID-ANIE2596>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020715)41:14<2596::AID-ANIE2596>3.0.CO;2-4)



Hot science

La desnitrificación en los humedales construidos

Georgina Martínez-Reséndiz*
Brenda Lizeth Monzón Reyes
Luis Carlos Sandoval Herazo

Resumen

Los humedales construidos son sistemas eficientes para la remoción de nutrientes (como el nitrógeno) en aguas residuales. La combinación de diferentes mecanismos biológicos, físicos y químicos contribuye a la reducción de los niveles de nitrógeno. La selección de plantas adecuadas, la combinación de diferentes tipos de humedales, el control de la carga de nitrógeno y el monitoreo regular son estrategias clave para prevenir la contaminación por nitrógeno en los humedales construidos.

Palabras clave: desnitrificación, humedales construidos, nutrientes.

Actualmente la preocupación por tener agua de calidad, así como el impacto ambiental de las actividades humanas ha llevado a la búsqueda de soluciones eficaces y sostenibles para el tratamiento óptimo de agua residual. Uno de los contaminantes característicos presentes en agua residual, es el nitrógeno, este se encuentra en forma de nitrato y amonio; y proviene de los desechos industriales, agrícolas y urbanos. Se sabe que, cuando hay niveles elevados de nitrógeno en el agua existe un riesgo potencial de ocasionar eutrofización en los cuerpos de agua, así como afectar negativamente los ecosistemas acuáticos y además poner en riesgo la salud humana. En este sentido, los humedales construidos han surgido como una alternativa promisoriosa para la eliminación del nitrógeno en aguas residuales, aprovechando los procesos naturales de filtración y biodegradación.

Laboratorio De Humedales y Sustentabilidad Ambiental, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

*Autor para la correspondencia:
georgina.martinez.tecm@gmail.com

¿Qué son los humedales construidos?

Los humedales construidos son sistemas que replican las funciones naturales de los humedales (Figura 1). Su objetivo principal es tratar aguas residuales y mejorar su calidad antes de ser liberadas al medio ambiente. Estos sistemas utilizan diferentes diseños y medios filtrantes para eliminar contaminantes y nutrientes del agua, reduciendo así el impacto ambiental de las descargas de aguas residuales, además, representan una opción económica y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, su estudio y aplicación han sido difundidos en diferentes partes del mundo.

Cuando se hace referencia a los humedales construidos, debemos destacar los diferentes tipos que existen, entre ellos, están los humedales de flujo libre superficial, en estos, el agua está expuesta a la atmósfera y a la luz solar, y fluye libremente sobre la superficie del sustrato. Estos sistemas son adecuados para tratar aguas residuales municipales y aguas pluviales [1], otro tipo de humedales son los de flujo subsuperficial, los cuales, son sistemas en los que el agua fluye por debajo de la superficie del sustrato y son adecuados para tratar aguas residuales municipales, aguas pluviales y aguas residuales industriales [2].



Figura 1. Humedal construido para el tratamiento de agua residual.

Mecanismos de remoción de nitrógeno en los humedales construidos

Como se mencionó anteriormente, uno de los contaminantes presentes en las aguas residuales es el nitrógeno, si bien, está documentado que los humedales construidos son capaces de remover nitrógeno (y otros contaminantes) de las aguas residuales, el exceso de este puede afectar la eficiencia de los humedales para tratar aguas residuales, es por ello que es importante tomar medidas para reducir la contaminación por nitrógeno y proteger los ecosistemas acuáticos y los humedales cons-

truidos. La transformación del nitrógeno, es inducida por microorganismos y ostentan un papel predominante en los humedales, la absorción y la adsorción por parte de las plantas también están presentes en cierta medida. Los procesos de eliminación de nitrógeno podrían experimentar variaciones debido al tipo de humedal empleado en el proceso, la carga aplicada, el periodo de retención hidráulica, la temperatura, la especie de planta utilizada y las características del sustrato [3], así los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales construidos son los que en conjunto remueven los contaminantes presen-

tes en las aguas residuales. A continuación, se describen estos procesos.

Procesos biológicos: son una de las principales formas en que los humedales construidos remueven el nitrógeno. Los microorganismos presentes en el sustrato del humedal convierten el nitrógeno amoniacal en nitrato, que luego es utilizado por las plantas para su crecimiento. Además, las bacterias desnitrificantes presentes en el sustrato del humedal convierten el nitrato en nitrógeno gaseoso, que es liberado a la atmósfera.

Procesos físicos y químicos: también pueden contribuir a la remoción de nitrógeno en los humedales construidos. Por ejemplo, la adsorción y la precipitación pueden remover el nitrógeno del agua, mientras que la volatilización puede remover el nitrógeno en forma de gas [4].

Estrategia biológica para mejorar la remoción de nitrógeno

Seleccionar apropiadamente la vegetación es importante, ya que desempeña un papel esencial en la remoción de la contaminación de nitrógeno. Está comprobado que ciertas especies, como *Typha domingensis* Pers, conocida como tule o espadaña, poseen la capacidad de eliminar nitrógeno presente en las aguas residuales [5]. La absorción a través de las plantas y los procesos microbianos son actores fundamentales para la disminución de los niveles de nitrógeno. Los microorganismos desnitrificadores autótrofos emplean elementos o compuestos inorgánicos como fuentes de electrones durante el proceso de desnitrificación [5].

Otra estrategia, es la combinación de diferentes tipos de humedales, por ejemplo, se puede hacer pasar el agua residual primero por un humedal de flujo subsuperficial vertical (nitrificación) y después por un humedal de flujo subsuperficial horizontal (desnitrificación) [6].

También, controlar la carga de nitrógeno en las aguas residuales que ingresan a los humedales construidos puede ayudar a prevenir la contaminación por este elemento. Esto se

puede lograr mediante la implementación de medidas de conservación del suelo y el agua, la reducción del uso de fertilizantes y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles.

Operación, monitoreo y mantenimiento

La operación es fundamental para garantizar el rendimiento óptimo de un humedal construido. El monitoreo regular de los parámetros del efluente, como las concentraciones de nitrógeno y el pH, son esenciales para evaluar la eficiencia del sistema. Cualquier desviación de los objetivos de tratamiento puede indicar la necesidad de ajustes en el diseño o el funcionamiento del humedal.

El cuidado de las plantas es una tarea continua, la poda, el adelgazamiento y la eliminación de vegetación muerta son necesarios para el crecimiento saludable y asegurar una adecuada absorción de nutrientes. Además, es necesaria la limpieza periódica para eliminar los sedimentos acumulados y prevenir la obstrucción de los canales. El monitoreo regular de los humedales construidos puede ayudar a prevenir la contaminación por nitrógeno, detectar problemas y tomar medidas para corregirlos, mientras que el mantenimiento regular puede ayudar a garantizar que los humedales construidos funcionen de manera óptima [7].

Evaluación del rendimiento y optimización

La evaluación regular del rendimiento del humedal es esencial para determinar su eficiencia en la eliminación de nitrógeno y otros contaminantes. Analizar los datos de monitoreo para calcular la reducción de nitrógeno y otros parámetros de interés, es esencial. Si el rendimiento no cumple con los objetivos establecidos, se deben de considerar ajustes en el diseño, la operación o el mantenimiento del humedal.

La optimización continua es clave para mejorar la eficiencia y la efectividad del sistema. La exploración y la implementación de tecnologías y enfoques innovadores pueden contribuir a enfrentar desafíos particulares y mejorar la eficacia en la eliminación de nitrógeno en siste-



Figura 2. Sustrato (grava roja) empleado comúnmente en los humedales construidos.

mas de humedales construidos.

Otro aspecto relevante, es el sustrato que actúa como soporte para las plantas y puede propiciar el desarrollo de biopelículas microbianas. Algunos sustratos como las zeolitas, la clinoptilolita, el carbón activado y la ceramsita tienen la capacidad de eliminar el nitrógeno de las aguas residuales mediante procesos de adsorción. Además, estos sustratos pueden combinarse con la desnitrificación microbiana al proporcionar electrones para los procesos de desnitrificación autótrofa y heterótrofa (Figura 2).

Beneficios y desafíos de los humedales construidos para la eliminación de nitrógeno

Los humedales construidos surgen como una valiosa solución con una serie de beneficios, comenzando que son sistemas de bajo costo en comparación con las tecnologías con-

vencionales, al mismo tiempo requieren una menor demanda energética. Sin embargo, su mayor atractivo radica en su enfoque natural y estéticamente agradable para el tratamiento de aguas residuales, fusionando la ingeniería con la naturaleza de manera armoniosa. Es importante saber que además de la eliminación de nitrógeno, los humedales construidos también pueden contribuir a la eliminación de otros contaminantes y así mejorar la biodiversidad local. Sin embargo, existen retos asociados con la implementación de humedales construidos, por ejemplo, la variabilidad climática y la fluctuación de las cargas de contaminantes pueden afectar el rendimiento del sistema. Además, el mantenimiento adecuado y la gestión a largo plazo son esenciales para evitar la degradación del humedal y garantizar su eficacia a lo largo del tiempo.

Perspectivas futuras y aplicaciones adicionales de los humedales construidos

La optimización de la configuración y el diseño de los humedales construidos, así como la selección adecuada de las especies vegetales, podría aumentar significativamente el rendimiento de desnitrificación durante el tratamiento de aguas residuales. Los humedales construidos son un medio valioso para la gestión del agua y así contribuir a mejorar la salud del medio ambiente, ya que ofrecen una serie de ventajas sobre otros métodos de tratamiento de aguas residuales convencionales, incluyendo su eficiencia energética, respeto al medio ambiente y versatilidad al disminuir la carga de contaminantes como el nitrógeno. **iBIO**

Glosario

Eutrofización: Es el incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton [8].

Referencias

- [1] Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecol Eng*, vol. 169, p. 106318, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318>.
- [2] Hassan, I., Chowdhury, S. R., Prihartato, P. K., & Razzak, S. A. (2021). Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential, *Processes*, vol. 9, no. 11, p. 1917, <https://doi.org/10.3390/pr9111917>.
- [3] Masoud, A. M. N., Alfarra, A., & Sorlini, S. (2022). Constructed Wetlands as a Solution for Sustainable Sanitation: A Comprehensive Review on Integrating Climate Change Resilience and Circular Economy. *Water (Basel)*, vol. 14, no. 20, p. 3232, <https://doi.org/10.3390/w14203232>.
- [4] Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., del Valle-Paniagua, D. H., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 10, no. 5, pp. 319–342, <https://doi.org/10.24850/j-ty-ca-2019-05-12>.
- [5] Maharjan, A. K., Mori, K., & Toyama, T. (2020). Nitrogen Removal Ability and Characteristics of the Laboratory-Scale Tidal Flow Constructed Wetlands for Treating Ammonium-Nitrogen Contaminated Groundwater. *Water (Basel)*, vol. 12, no. 5, p. 1326, <https://doi.org/10.3390/w12051326>.
- [6] Van Cleemput, O., Boeckx, P., Lindgren, P.-E., & Tonderski, K. (2007). Denitrification in Wetlands, in *Biology of the Nitrogen Cycle*, Elsevier, pp. 359–367. <https://doi.org/10.1016/B978-044452857-5.50024-2>.
- [7] Luna-Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*, vol. 17, no. 1, pp. 32–55, [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(14)70318-3).
- [8] Real Academia Española. (2014). Eutrofización, en *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 21 de septiembre, 2023, de <https://dle.rae.es/eutrofización>.



Hot Science

Las Electro-poderosas: Bacterias creadoras de electricidad

Resumen

A medida que se estudian a las bacterias, más nos sorprenden, esta vez nos encontramos con bacterias que tienen la facultad de producir electricidad mediante el uso de un dispositivo conocido como Celda de Combustible Microbiana (CCM), que produce electricidad por medio de la respiración celular, además este descubrimiento puede tener diversas aplicaciones para lograr tecnologías amigables con el ambiente. Entre las aplicaciones de la CCM está el tratamiento de aguas residuales de diversos efluentes, tratamiento de suelos contaminados y recuperación de metales de interés.

Palabras clave: bacterias exoelectrogénicas, electricidad, Celda de Combustible Microbiana.

Cuando pensamos en un científico, imaginamos a un ser fuera de serie con el pelo despeinado y un tanto chiflado. Puede que también pensemos en una persona socialmente retraída y reservada, por ejemplo, el Dr. Robert Bruce Banner, mejor conocido como Hulk. Este personaje, a consecuencia de sus experimentos en el laboratorio fue expuesto accidentalmente a la radiación gamma que modificó su ADN. Esto originó una mutación que le otorgó facultades superiores poco comprendidas por el entorno. Como sabemos, la realidad supera la ficción, y como en los cómics, puede haber historias de superhéroes: seres vivos que de acuerdo con las condiciones de su hábitat se han adaptado y desarrollado un superpoder; sin embargo, este permaneció oculto y fue descubierto hasta

Marcela Méndez-Tovar*¹

Ma. Concepción Romero-Serrano*²

¹Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro.

²Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

*Autores para la correspondencia

¹marcela.mendez.tovar@gmail.com

²concepcionmacoro@gmail.com

principios del siglo pasado, para que en un futuro esté al servicio de toda la humanidad. Nos referimos a las bacterias capaces de producir electricidad.

El comienzo de todo

El ser humano ha tenido un gran interés por experimentar con la energía eléctrica en seres vivos. Los primeros estudios que relacionaron la electricidad con los seres vivos se publicaron alrededor del año 1791. Fueron realizados por el médico italiano Luigi Galvani, un eminente profesor de anatomía en la universidad de Bolonia. Galvani estudiaba los efectos de la electricidad en las ranas, y para él los tejidos animales estaban dotados de electricidad, promoviendo la contracción de los músculos. Los trabajos de Galvani inspiraron a Mary Shelley en la escritura de la novela Frankenstein que ha mostrado la fascinación por el uso de la electricidad. Aunque se han estudiado los efectos de aplicación de la electricidad en seres vivos, también puede ser al revés, es decir utilizar un ser vivo para producir energía eléctrica. En 1911 Michael Potter, profesor de Botánica en la universidad de Durham; construyó por primera vez una “celda bacteriana” que en la actuali-

dad se le conoce como “Celda de Combustible Microbiana” (CCM) [1,2]. En este dispositivo se observó cómo algunas bacterias tienen el superpoder de generar electricidad [3].

Este tema permaneció como algo curioso y hasta principios de 1960 fue retomado por científicos para investigar cómo producir electricidad a partir de diferentes tipos de bacterias y biorresiduos en naves espaciales.

El surgimiento del poder

Los seres humanos para vivir consumimos diversos alimentos ó compuestos orgánicos que representan una fuente de carbono. Al introducirse en nuestro cuerpo son transformados por diversas reacciones bioquímicas que conforman el metabolismo, de esta manera se obtiene la energía para que nuestro organismo

funcione. Como parte de este proceso, a nivel celular hay una cadena de reacciones químicas en las que se producen electrones que son transportados “eslabón por eslabón”. En el último eslabón ó al final de la cadena; el oxígeno acepta los electrones por lo que al oxígeno se le llama aceptor final; además, en este proceso se libera energía, dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). A este recorrido de electrones cuyo aceptor final es el oxígeno y en donde se libera energía se le denomina respiración aerobia. En otras palabras, somos aerobios debido a que el aceptor final de electrones es el oxígeno, es decir respiramos oxígeno. En el caso de las bacterias, la mayoría también consumen fuentes de carbono, algunas de ellas son aerobias (requieren oxígeno para su respiración), y tienen sus propias reacciones metabólicas. Pero a diferencia de nosotros, existen bacte-

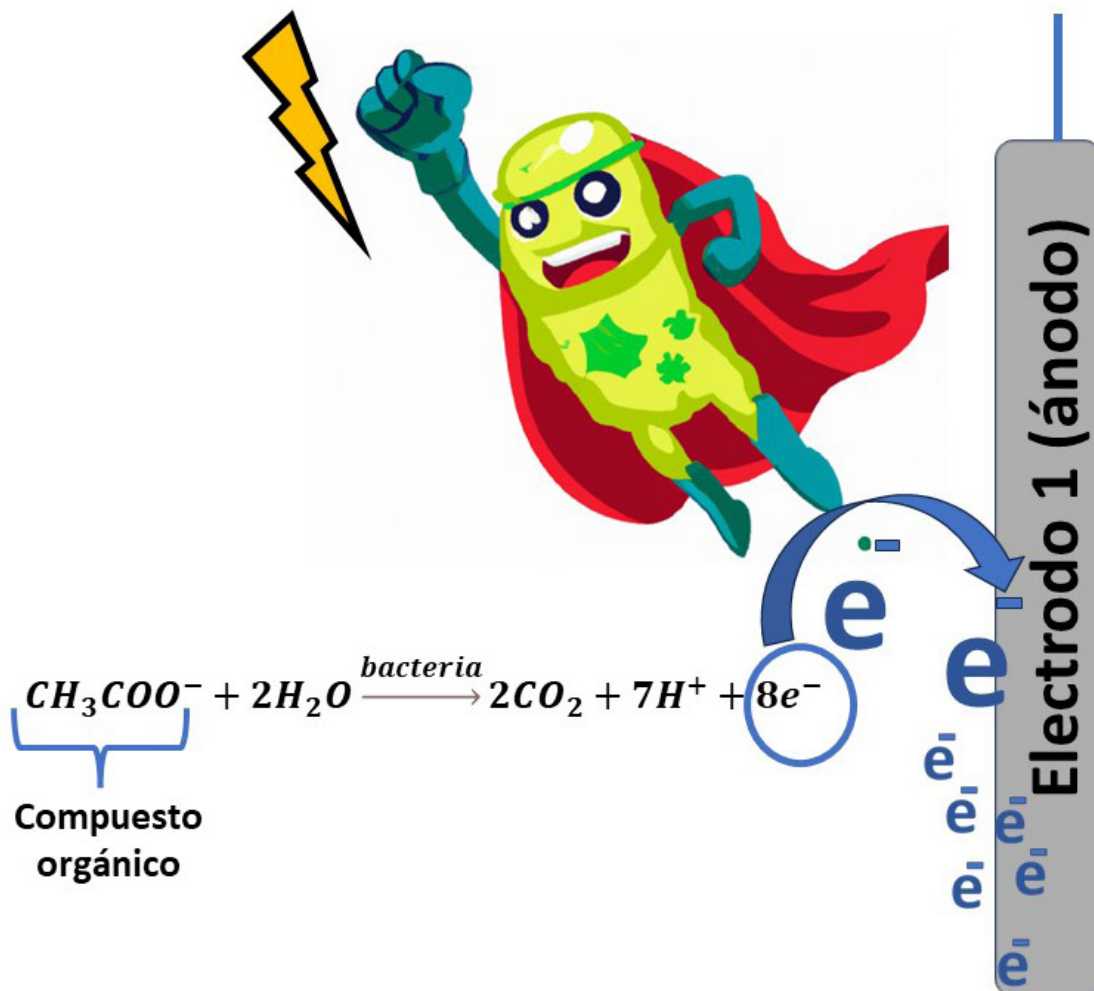


Figura 2. Bacteria exoelectrogénica transfiriendo electrones al electrodo 1 (ánodo). La reacción de oxidación que se presenta propone el ion acetato, sin embargo, podría utilizarse otro compuesto orgánico.

rias que no necesitan oxígeno, por lo que se les denomina anaerobias. Su respiración celular usa otros aceptores finales diferentes del oxígeno; como pueden ser iones inorgánicos, por ejemplo: el nitrato, el sulfato, o algún metal. Cuando el aceptor final es un metal se dice que “estas bacterias tienen la capacidad de respirar metales”. Estas bacterias que tienen la capacidad de respirar metales, transfieren electrones a un electrodo (hecho de una barra de metal u otro material). El pase de electrones entre la bacteria y el electrodo sucede mediante reacciones químicas redox (reacciones de oxidación-reducción), ver Figura 1. Debido a esta característica tan peculiar a estas bacterias se les conoce como exoelectrogénicas, que se refiere a aquellos microorganismos que pueden transferir electrones fuera de su membrana celular. De aquí proviene su superpoder. Entre las bacterias más importantes que se conocen por ser exoelectrogénicas y utilizarse en las CCM, se encuentran *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis* [3]. Estas bacterias se han encontrado en sedimentos marinos y ambientes acuáticos. Se sabe que ambas especies requieren de carbono y compuestos orgánicos como fuentes de energía y crecimiento [4,5]. Además, *G. sulfurreducens* está catalogada como una bacteria anaerobia. Por otro lado, *S. oneidensis* puede vivir con y sin oxígeno, por lo que se le clasifica como facultativa. Lo sorprendente es que a partir de las CCM que han producido electricidad, estas bacterias se han aislado e identificado por medio de técnicas microbiológicas, y de biología molecular [4–6]. Por consiguiente, después de años de ardua investigación a este par de bacterias se les reconoce como las protagonistas del superpoder de producir electricidad [4,5].

La unión hace la fuerza

Si sólo estuviera una bacteria exoelectrogénica adherida al electrodo, la cantidad de electrones que pudiera ceder sería muy poca y, por lo tanto, la electricidad que se generaría sería muy limitada; sin embargo, así como los humanos, las bacterias pueden formar comunidades que les ayudan a incrementar su

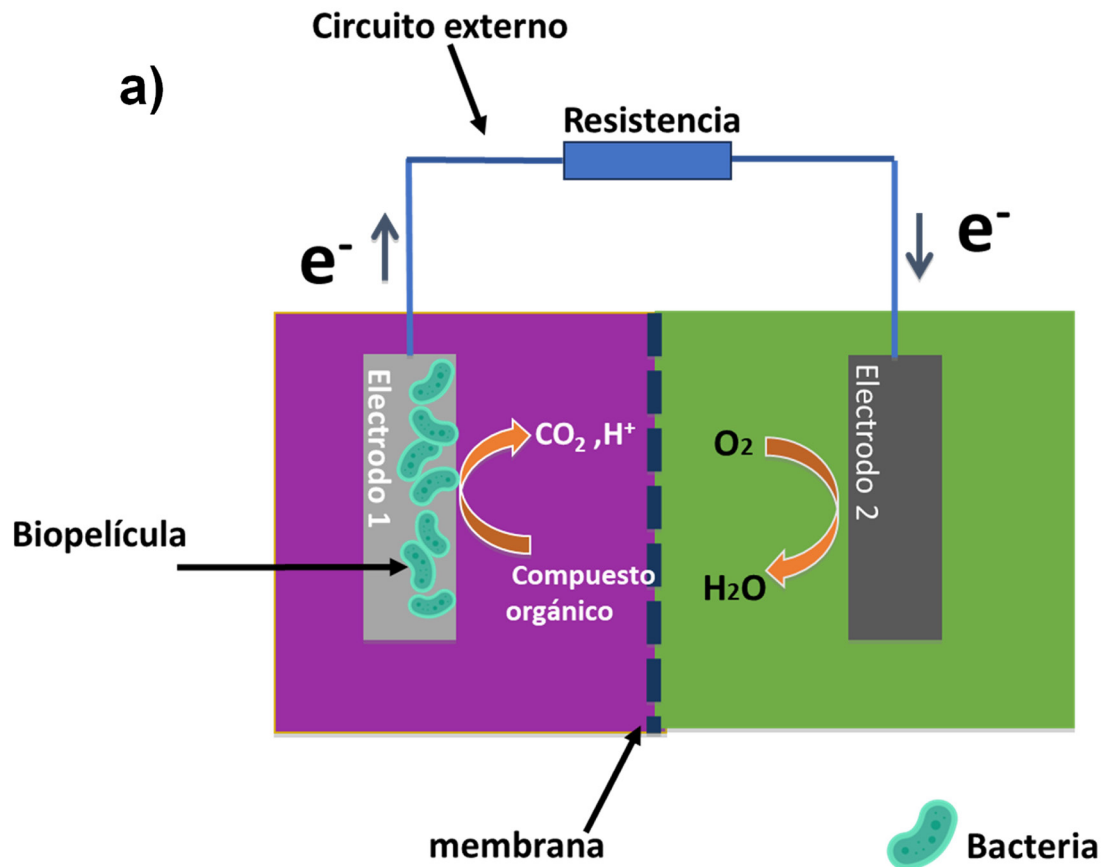
supervivencia. Además, dichas comunidades liberan sustancias pegajosas conocidas como sustancias poliméricas extracelulares. Estas sustancias están formadas por una mezcla de polisacáridos, fosfolípidos, material genético (ADN) y diversos biopolímeros que permiten que las bacterias se adhieran o se anclen sobre un soporte (por ejemplo, la superficie de un electrodo). Esta capacidad de permanecer unidas entre ellas les posibilita formar lo que se conoce como una biopelícula. En conclusión, las biopelículas conformadas por muchas bacterias exoelectrogénicas permiten que exista un mayor flujo de electrones hacia un electrodo y por lo tanto se puede producir una mayor cantidad de electricidad.

El poder es para servir

Debido a la actual crisis energética y ambiental que vive la humanidad, los países miembros de las Naciones Unidas, entre ellos México; han adoptado un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta, asegurar la paz y prosperidad para todos. Estos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un llamado para desarrollar tecnologías que mejoren el mundo. Entre estas tecnologías se encuentran las enfocadas a la producción de energías limpias. En este contexto, la CCM es un dispositivo enfocado a producir electricidad; la configuración que tiene la CCM permite la generación de un voltaje. Dentro de la CCM, las bacterias exoelectrogénicas se pegan a un electrodo, forman biopelículas y se alimentan de compuestos orgánicos añadidos (Figura 2). Al estar adheridas al electrodo, sucede el proceso de respiración y transfieren electrones al electrodo [3]. Aunque puede parecer complejo, la CCM ha tenido diversas aplicaciones, siendo su principal uso para remover contaminantes del agua (aguas residuales). En este caso, las bacterias exoelectrogénicas se añaden a la CCM con el agua residual y junto con otras bacterias consumen los contaminantes orgánicos presentes. Las bacterias exoelectrogénicas al estar adheridas al electrodo “respiran metales”, por lo tanto, se produce electricidad y el consumo del contaminante or-

gánico mejora la calidad del agua. Esto promueve dos acciones benéficas: 1) Producir electricidad a partir de un agua contaminada, 2) el agua contaminada a su vez se limpia debido a que las bacterias se alimentan del contaminante orgánico. Se han estudiado las CCM para la producción de electricidad con aguas de diferentes efluentes, como aguas residuales domésticas, entre ellas la orina humana denominada agua amarilla [7]. También se han empleado aguas residuales de procesos industriales: de papa, lácteos, arroz, cerveza, y de efluentes de rastros porcinos, entre otros [8]. Adicionalmente, la CCM ha tenido otras aplicaciones que involucran la recuperación de compuestos con alto valor añadido. Por ejemplo, el nitrógeno empleado para producir fertilizantes, el hidrógeno como combustible y diversos metales como: mercurio, plata, cromo, cobre, y cadmio [7,9]. Estas aplicaciones representan una gran ventaja en favor de la economía circular, la cual es un modelo en el que se pretende mantener el mayor tiempo posible de vida útil de un producto, promoviendo menores daños ambientales. También las CCM se han utilizado para el tratamiento de agua y suelos contaminados con hidrocarburos como son las gasolinas, el diésel y diversos compuestos alifáticos y aromáticos [10].

Por otro lado, la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, de Estados Unidos) tiene proyectos que involucran aplicaciones prometedoras con distintos objetivos; por ejemplo, convertir desechos en energía reutilizable en misiones espaciales, o como suministro energético para baterías implementadas en robots. Lo que representa una



b)

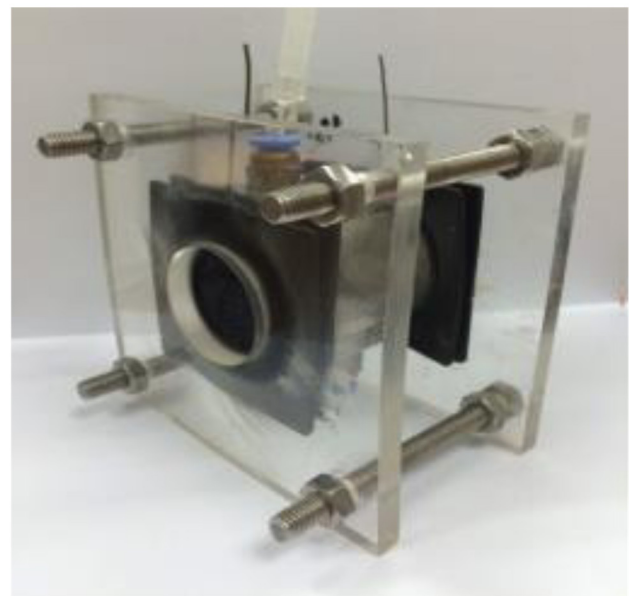



Figura 2. Celda de Combustible Microbiana (CCM). a) Representación de una CCM, b) CCM de una sola cámara, imagen obtenida de: Sawasdee, V., SiriornBoonyawanich y NiponPisutpaisal [13].

fuentes de energía alternativa con respecto a las energías obtenidas mediante la quema de combustibles fósiles, así como la solar y la nuclear [11,12].

Las electro-poderosas: Un nuevo universo

Debido a que las bacterias exoelectro-génicas ó electro-poderosas pueden transferir electrones se encuentran en investigación, hay diferentes áreas que se centran en los mecanismos de transferencia de electrones, el diseño de la CCM, y en el estudio de las comunidades microbianas. Los avances por resaltar son que se han descubierto tres formas de transferir electrones al electrodo: por mediadores (compuestos químicos), citocromos (proteínas redox) y pilis (nanocables). Otro suceso relevante fue el aislamiento de los nanocables de *Geobacter sulfurreducens* para producir electricidad [14]. Este hallazgo podría permitir la conexión de varias CCM para generar corriente y alimentar dispositivos electrónicos (smartphones, tablets, entre otros). Además, se debe de considerar el papel que juega la formación, desarrollo y evolución de las biopelículas. Por lo que las investigaciones seguirán evolucionando y en el futuro tal vez puedas cargar tu dispositivo favorito con la energía producida por las bacterias electro-poderosas.

Si quieres aprender más y cómo construir una CCM visita la página: <https://www.ncbe.reading.ac.uk/microbial-fuel-cell/> 

Agradecimientos

Agradecimientos: Ma. Concepción Romero-Serrano agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de estancia Posdoctoral.

Referencias

[1] He, Z., & Angenent, L. T. (2006). Application of Bacterial Biocathodes in Microbial Fuel Cells. *Electroanalysis*, 18(19-20), 2009-2015. <https://doi.org/10.1002/elan.200603628>
[2] University of Reading. National Centre for Biotechno-

logy Education. (s. f.). <https://www.ncbe.reading.ac.uk/microbial-fuel-cell/>
[3] Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5), 464-482. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>
[4] Ikeda, S., Takamatsu, Y., Tsuchiya, M., Suga, K., Tanaka, Y., Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2021). *Shewanella oneidensis* MR-1 as a bacterial platform for electro-biotechnology. *Essays in Biochemistry*, 65(2), 355-364. <https://doi.org/10.1042/EBC20200178>
[5] Howley, E., Ki, D., Krajmalnik-Brown, R., & Torres, C. I. (2022). *Geobacter sulfurreducens*' Unique Metabolism Results in Cells with a High Iron and Lipid Content. *Microbiology Spectrum*, 10(6), e02593-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02593-22>
[6] Logan, B. E. (2007). *Microbial Fuel Cells* (1.a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470258590>
[7] Patel, A., Mungray, A. A., & Mungray, A. K. (2020). Technologies for the recovery of nutrients, water and energy from human urine: A review. *Chemosphere*, 259, 127372. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127372>
[8] Pant, D., Singh, A., Van Bogaert, G., Irving Olsen, S., Singh Nigam, P., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2012). Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters. *RSC Adv.*, 2(4), 1248-1263. <https://doi.org/10.1039/C1RA00839K>
[9] Nancharaiyah, Y. V., Venkata Mohan, S., & Lens, P. N. L. (2015). Metals removal and recovery in bioelectrochemical systems: A review. *Bioresource Technology*, 195, 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.058>
[10] Li, T., Li, R., & Zhou, Q. (2021). The application and progress of bioelectrochemical systems (BESs) in soil remediation: A review. *Green Energy & Environment*, 6(1), 50-65. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.06.026>
[11] *Synthetic Biology and Microbial Fuel Cells: Towards Self-Sustaining Life Support Systems*. (s. f.). <https://www.nasa.gov/centers/ames/cct/office/cif/2011/microbial-fuel-cells.html>
[12] *Electrified Bacteria Clean Wastewater, Generate Power*. (s. f.). https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2019/ee_1.html
[13] Sawasdee, V., SiriornBoonyawanich y NiponPisutpaisal. (2015). Simultaneous Treatment of Nitrogen-Rich Wastewater and Electricity Generation using Single-Chamber Microbial Fuel Cells. *Energy Procedia*, 79, 624-628. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.543>
[14] Liu, X., Gao, H., Ward, J. E., Liu, X., Yin, B., Fu, T., Chen, J., Lovley, D. R., & Yao, J. (2020). Power generation from ambient humidity using protein nanowires. *Nature*, 578(7796), 550-554. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2010-9>



Hot science

La cerveza de maíz

Miguel Ángel Hernández-Carapia^{1*}
José Ramón Verde-Calvo¹
Héctor Bernardo Escalona-Buendía²

Resumen

La cerveza es una bebida alcohólica fermentada cuyos ingredientes principales son agua, malta (principalmente de cebada), levadura y lúpulo. Al ser rico en almidón, el maíz es una excelente materia prima para la fabricación de cerveza. Bajo condiciones óptimas de temperatura y tiempo de germinación se pueden elaborar maltas de maíz azul, rojo y blanco cuyo paquete enzimático es capaz de producir suficientes azúcares fermentables. Con estas maltas se han elaborado cervezas con sabores y aromas desde ligeros como florales y afrutados hasta otros más intensos como café o cacao, siempre con la presencia de ese agradable gusto del maíz.

Palabras clave: cerveza, maíz, malteado.

La cerveza es una bebida alcohólica obtenida por la fermentación de los mostos (infusiones) de diversos cereales. Sin embargo, a diferencia de otras materias primas como las uvas que se utilizan para producir vino, en las que los azúcares están disponibles para que las levaduras se alimenten y lleven a cabo la fermentación alcohólica, en los cereales esos azúcares se encuentran empaquetados en forma de almidón (cadenas largas de glucosa). Por tal motivo, para obtener una bebida fermentada de cualquier cereal primero es necesario liberar esos azúcares. Una de las formas de hacerlo es mediante una germinación controlada de los granos.

La germinación y los fenómenos bioquímicos que ocurren en las semillas

La germinación es una etapa en el ciclo de vida de las plantas en la que a partir de una

¹Laboratorio de Enología y Alimentos Fermentados, Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana.

²Laboratorio de Análisis Sensorial y Estudios con Consumidores, Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana.

*Autor para la correspondencia:
carapiavi@yahoo.com.mx

semilla crece una planta capaz de generar su propio alimento [1]. El embrión, que es la parte de la semilla de la cual surgirá la nueva planta, necesita nutrientes para crecer y desarrollarse, los cuales se encuentran almacenados en la misma semilla en moléculas de gran tamaño, una forma inaccesible para el embrión. Por esto, cuando la semilla se encuentra en condiciones óptimas para germinar comienza a producir diversas enzimas hidrolíticas (un tipo de proteínas especializadas), cuya función es degradar esas moléculas de reserva, entre ellas proteínas, lípidos y el almidón mismo, para que estos nutrientes sean accesibles para el embrión [2]. Estas reacciones bioquímicas son las que se aprovechan, en un proceso denominado malteado, para acceder a los distintos nutrientes y poder producir cerveza.

El malteado de los cereales

El malteado puede definirse como una germinación controlada de los cereales, y su objetivo es la producción de maltas, una de las materias primas para la fabricación de cerveza. Este proceso consta de tres etapas: 1) remojo, en el que el grano absorbe agua, hidrata sus diferentes estructuras y activa la germinación; 2) germinación, cuya finalidad es la síntesis y activación de enzimas y movilización de nutrientes hacia el embrión, con lo cual este comienza su desarrollo; 3) secado, cuya finalidad es detener

la germinación mediante un tratamiento con temperaturas controladas para que los granos alcancen una humedad baja. Los objetivos del malteado son, entre otros, la modificación de la estructura física del grano, así como la síntesis y activación de toda una serie de enzimas [3].

El proceso de fabricación de la cerveza

Una vez obtenidas las maltas, estas se someten a molienda para reducir el tamaño y exponer el endospermo del grano (la parte que contiene al almidón, azúcares y diversas enzimas producidas en el malteado). El producto de la molienda es sometido a maceración a una temperatura o a un programa de temperaturas controladas, para que por la acción de las enzimas hidrolíticas se liberen los nutrientes necesarios para la fermentación, entre ellos los azúcares fermentables (maltosa, maltotriosa y glucosa, principalmente). Terminado el tiempo programado, se incrementa la temperatura del macerado para detener la actividad de las enzimas. Al producto obtenido en esta etapa se le

conoce como mosto dulce, debido al gusto que le confieren los azúcares producidos.

El mosto dulce se lleva a una etapa de cocción en la cual se somete a ebullición constante durante un tiempo determinado. En esta etapa se añade otro ingrediente imprescindible en la fabricación de cerveza: el lúpulo (flor femenina de la especie *Humulus lupulus*). Este ingrediente se usa a manera de hierba aromática en la cerveza porque, además de aportar el característico gusto amargo a la cerveza e inhibir el crecimiento de cierto tipo de bacterias (que, si bien no son patógenas, sí son perjudiciales para el perfil sensorial y la conservación de la cerveza), también aporta diversos aromas y sabores. El producto obtenido en esta etapa se conoce como mosto amargo, debido al gusto conferido por el lúpulo.

Recién terminada la cocción, el mosto amargo se enfría y se adicionan las levaduras, las cuales llevan a cabo la fermentación alcohólica, etapa en la que el mosto amargo se convierte en cerveza. El producto de esta eta-

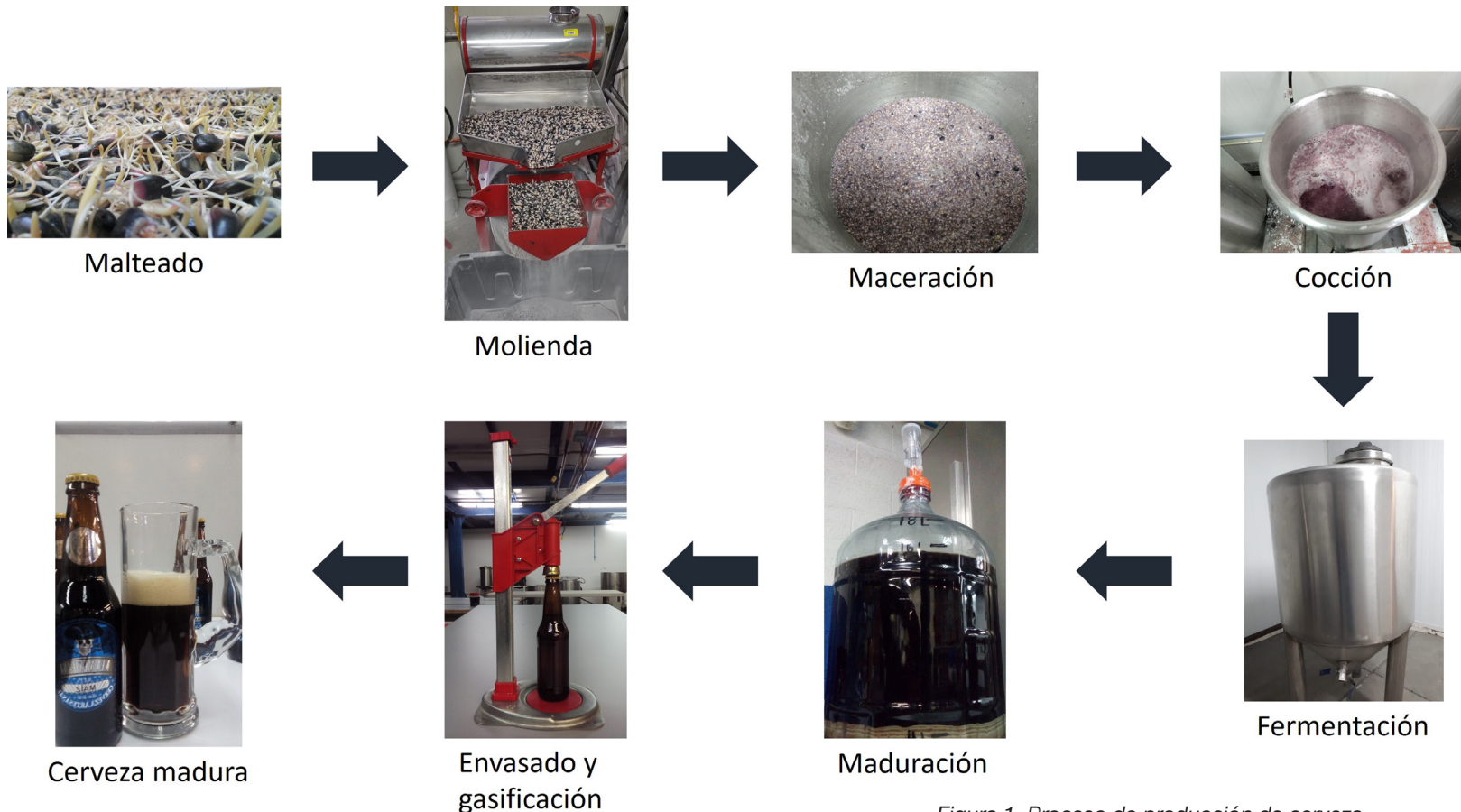


Figura 1. Proceso de producción de cerveza.

pa se conoce como cerveza verde, debido a la presencia de compuestos que le confieren algunos aromas y sabores que recuerdan a hierba, y también como una forma de decir que a la cerveza aún le falta maduración.

La cerveza verde se separa de los sedimentos (entre los que se encuentran la mayoría de las levaduras) y se deposita en otro tanque (de acero inoxidable, generalmente) en donde se deja reposar por dos o más semanas (dependiendo de la temperatura empleada), para que se lleve a cabo la maduración, en la cual la cerveza experimenta algunos cambios como la desaparición de las notas verdes para así dar paso a la presencia de notas más afrutadas o a cereales. Esta estancia en el tanque permite la clarificación natural de la cerveza, lo cual se ve favorecido por las bajas temperaturas.

Una vez madura, la cerveza se somete a un proceso de gasificación que puede ser exógena (el dióxido de carbono, también conocido como CO_2 , se inyecta directamente en la cerveza bajo ciertas condiciones de presión y temperatura) o endógena (el CO_2 se obtiene de manera natural a través de una segunda

fermentación, realizada directamente en la botella). Una vez gasificada, la cerveza está lista para su consumo.

Cereales empleados en la producción de cerveza

El cereal más común para la producción de cerveza es la cebada debido a la mayor facilidad en su manejo durante el malteado, a las ventajas que ofrecen las cascarillas que recubren los granos (sirven como un filtro natural durante la maceración), pero principalmente a la capacidad que tiene su paquete enzimático para producir los azúcares fermentables necesarios a partir del almidón. No obstante, es común encontrar en el mercado algunas cervezas elaboradas con cereales distintos a la cebada, como de trigo o centeno, este último más relacionado con las cervezas artesanales. Y, aunque es poco común en nuestro país, en otros lugares se elaboran cervezas de cereales como el sorgo o el arroz.

La UAM y la cerveza de maíz

Si bien fuera del ámbito cervecero poco se sabe, el maíz tiene un papel muy importante



Figura 2. Maltas base de maíz. De izquierda a derecha: maíz blanco, maíz rojo, maíz azul y maíz morado.

en la producción de cerveza, principalmente a nivel industrial, ya que se utiliza sin maltear (en forma de sémola u hojuelas) como una fuente de carbohidratos alternativa a la malta de cebada (algo que en el argot cervecero se conoce como adjunto) y uno de los principales objetivos de su uso es la reducción de costos. No obstante su importancia, hasta no hace muchos años el uso del maíz se limitaba al ya mencionado debido a diferentes razones, por ejemplo a que el malteado del maíz es un proceso más complicado que el de la cebada. Sin embargo, el principal motivo es la baja capacidad que tiene el paquete enzimático de sus maltas para degradar el almidón y producir azúcares fermentables. Debido a esto, e inspirados en el sendechó (bebida tradicional de maíz producida en comunidades otomíes y mazahuas), en los laboratorios de Enología y Alimentos fermentados y de Análisis Sensorial de la UAM Iztapalapa se inició un proyecto para optimizar el malteado del maíz y así obtener maltas capaces de producir los azúcares fermentables necesarios para la fabricación de cervezas 100 % con maíz. Para ello se utilizó maíz azul y rojo de la raza Chalqueño, producido en la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México. En este proyecto, se emplearon diferentes tiempos y temperaturas de germinación y se determinaron las condiciones que permitieran la obtención de las mejores maltas. Asimismo, se evaluaron distintos programas de maceración (tiempos y temperaturas) para elegir aquél con el que se obtuviera la mayor cantidad de

azúcares fermentables [4].

Tras el esfuerzo y dedicación del equipo de investigación se obtuvieron diferentes estilos de cervezas hechas 100% con maíz azul, rojo y, más recientemente, con maíz blanco, todos de la raza Chalqueño, una raza nativa de México y ampliamente cultivada en el Valle Central [5]

Los sabores y aromas de las cervezas de maíz producidas son muy diversos, pues dependen de distintos factores tales como el tipo de maltas empleadas (maltas base, que son maltas con tratamiento térmico a bajas temperaturas, o maltas especiales que tienen tratamientos térmicos con temperaturas más altas), el tipo de lúpulo, el tipo de fermentación (fermentación lager, que se realiza a temperaturas entre 8-14 °C y permite una mayor presencia de los sabores y aromas provenientes de las maltas, o fermentación ale, que se hace a temperaturas entre 16-22 °C y aporta más notas florales



Figura 3. Cervezas de maíz desgasificadas. De derecha a izquierda: cerveza de maíz azul, cerveza de maíz rojo y cerveza de maíz blanco.

Figura 4. Diversidad de maíces criollos.



y frutales) y la cepa de levadura utilizada. En general, las cervezas de maíz hechas 100 % con malta base (Figura 3), que son las maltas que aportan los azúcares fermentables, pueden tener sabores y aromas a miel, flores, y algunos afrutados como plátano y piña, en mayor o menor medida dependiendo del tipo de fermentación. Por su parte, entre las notas que aportan las maltas de maíz rojo y azul están los frutos

rojos, pan, especias y, desde luego, es posible detectar la presencia de aromas y sabores de maíz, que son parte de la identidad de estas cervezas, y que fácilmente nos recuerdan a bebidas más conocidas como el atole o el champurrado. Entre las notas provenientes del lúpulo podemos encontrar a los cítricos, frutas tropicales, flores o especias. En las cervezas de maíz hechas, además de maltas base, con maltas especiales (más tostadas) podemos encontrar aromas y sabores de caramelo, piloncillo, cacao, café, ahumado o tabaco, por mencionar algunos.

Actualmente la UAM cuenta con una patente por el proceso de producción de la cerveza de maíz (patente 365910). Una de las razones que motivó a este proyecto fue ofrecer otro uso a estos maíces (principalmente a las variedades coloridas, que son menos utilizadas que las blancas o amarillas) para estimular su producción y ayudar a su preservación a través de una cerveza que, si bien es una bebida alcohólica, recordemos que lo que daña no es propiamente el producto, sino el exceso. Pues ya lo dijo Paracelso, el padre de la toxicología: “*Dosis sola facit venenum*” (la dosis hace al veneno) [6]. **iBIO**

Referencias

- [1] Yao, Y., Xin, M., Ni, Z., & Sun, Q. (2020). Importance of small RNA in plant seed germination en P. Guleria y V. Kumar (Eds.), *Plant Small RNA* (pp. 117–123). Academic Press. ISBN 9780128171127
- [2] Ellis, R.H. (2007). The encyclopedia of seeds: science, technology and uses. *Annals of Botany*, 100 (6), 1379. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm225>
- [3] MacLeod, L., Evans, E. (2016). Malting en *Reference Module in Food Science* (pp.1-11). Elsevier. ISBN 9780081005965
- [4] Hernández-Carapia, M. A. (2021). *Estudio del efecto de la temperatura y el tiempo de germinación sobre el poder diastásico de las maltas de maíz azul y rojo de la raza Chalqueño, así como de la evolución de los compuestos volátiles durante el envejecimiento de cervezas producidas con estas maltas* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio institucional de la Universidad Autónoma Metropolitana <http://tesis.uam.mx/uam/aspuam/presentatesis.php?recno=23933&docs=UAMII23933.pdf>
- [5] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (19 de julio de 2023). *Chalqueño*. <http://www.biodiversidad.gob.mx:9999/diversidad/alimentos/maices/razas/grupo-conico/chalqueño>
- [6] BBC News Mundo (19 de julio de 2023). *Quién fue Theophrastus Phillippus Aureolus Bombastus von Hohenheim (alias Paracelso) y cómo cambió la historia de la medicina*. [https://www.bbc.com/mundo/noticias-44854542#:~:text=%22Dosis%20sola%20facit%20venenum%22%20\(%2C%20la%20m%C3%A1xima%20de%20esa%20disciplina](https://www.bbc.com/mundo/noticias-44854542#:~:text=%22Dosis%20sola%20facit%20venenum%22%20(%2C%20la%20m%C3%A1xima%20de%20esa%20disciplina)

Hot science



Hongos comestibles: fuente de compuestos bioactivos

*Hypatia Arano Varela
César Díaz Talamantes**

*Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma,
Depto. Ciencias de la Salud.*

**Autor para la correspondencia: c35ardt@hotmail.com*

Resumen

Los hongos comestibles son considerados alimentos funcionales debido a su alto contenido nutricional y energético; además, producen compuestos químicos con actividades biológicas que ayudan a mejorar la calidad de vida de sus consumidores. Al ser ingredientes fundamentales en la actual tendencia por la ingesta de alimentos naturales, inocuos y nutritivos, su demanda va en aumento. En este sentido, la biotecnología provee técnicas que permiten la obtención masiva de cuerpos fructíferos mediante el cultivo *in vitro* para satisfacer la demanda comercial, y por otro lado, para proveer materia prima a los estudios enfocados en la identificación y producción de compuestos bioactivos.

Palabras clave: hongos comestibles, cultivo *in vitro*, compuestos bioactivos.

Hongos como alimentos funcionales

Los hongos comestibles son alimentos naturales, de buen sabor, inocuos, nutritivos, libres de agroquímicos, conservadores y otros productos químicos. Son considerados alimentos funcionales debido a que además de su alto valor nutritivo, tienen la capacidad de fabricar moléculas con propiedades biológicas (compuestos bioactivos) que ejercen efectos positivos sobre la salud humana al reducir el riesgo de padecer algunas enfermedades como cáncer, diabetes e hipertensión [1]. En México, su consumo, recolección y venta son una tradición arraigada [2].

La concentración de proteínas en los hongos comestibles es similar a la de la carne de cerdo, además de que contienen todos los aminoácidos esenciales. También, son ricos en carbohidratos, vitaminas, fibra, minerales y tienen un bajo contenido de grasas (Tabla 1). Por lo anterior, se recomienda incluir a los hongos en la dieta diaria [3].

Cultivo *in vitro* de hongos comestibles

Se estima que a nivel mundial existen cerca de 2000 especies comestibles, de las cuales solo se cultivan experimentalmente alrededor de 100; a pesar de que 50 poseen valor económico, sólo 30 son cultivadas con fines comerciales y únicamente seis lo son a nivel industrial [5]. En nuestro país, pese a que se cuenta con una variedad de aproximadamente 371 especies silvestres reportadas como comestibles, solo se cultivan menos de 10 a gran escala, entre las especies más conocidas están: *Pleurotus ostreatus* (seta), *Agaricus bisporus* (champiñón), *Lentinula edodes* (shiitake), *Ganoderma spp.* (reishi), *Ustilago maydis* (cuitlachoche), *Hericium erinaceus* (melena de león) y *Flammulina velutipes* (enoki) [2], algunas de ellas se pueden observar en la Figura 1.

Cultivo *in vitro* de hongos comestibles

Las técnicas biotecnológicas como el cultivo *in vitro*, permiten conocer y manipular en condiciones de esterilidad los requerimientos nutricionales y ambientales (incluyendo, fuente de carbono, relación carbono/nitrógeno, humedad, oxigenación, temperatura, intensidad lu-

Tabla 1. Parámetros nutricionales de variedades de hongos comestibles.

Parámetros nutricionales	<i>Agaricus bisporus</i> (champiñón)	<i>Pleurotus eous</i> (seta)	<i>Volvariella volvacea</i> (hongo del bagazo)	<i>Lentinula edodes</i> (shiitake)
Proteína (%)	29.14	19.59	38.1	18.85
Carbohidratos (%)	51.05	64.34	42.3	63.6
Grasas (%)	1.56	1.05	0.97	1.22
Vitamina D (UI/g)*	984	487	462.04	205
Sodio (mg/Kg)	500.8	208.87	345.34	82.49
Potasio (%)	4.21	2.7	4.16	2.1
K:Na	84:1	129:1	120:1	255:1
Hierro (mg/Kg)	85.86	183.07	72.51	37.55
Manganeso (mg/Kg)	7.97	6.47	--	17.48
Zinc (mg/Kg)	79.64	162.18	94.28	89.63
Selenio (mg/Kg)	1.34	ND	ND	ND

*1UI de vitamina D = 0.025 µg de colecalciferol/ergocalciferol



Figura 1. Especies de hongos comestibles cultivadas. De izquierda a derecha: *Hypsizygus marmoreus*, *Agaricus brunnescens*, *Hypsizygus marmoreus* y *Pleurotus eryngii*.

mínica y pH, entre otros) de los hongos comestibles para aumentar su tasa del crecimiento, la producción de biomasa, compuestos bioactivos y enzimas [1].

El cultivo *in vitro* es fundamental para aislar y conservar cepas de hongos comestibles, también, es posible obtener cuerpos fructíferos a mayor escala, lo que propiamente se conoce como cultivo de hongos comestibles (Figura 2). Actualmente, esta práctica emergente ha alcanzado una gran importancia social, económica y ecológica. Es una actividad con mucho potencial económico y sobre todo sustentable: utiliza como sustratos diversos residuos agroalimentarios, requiere poca inversión y una capacidad tecnológica relativamente baja, además de que puede implementarse en un amplio rango de temperaturas, desde climas templados hasta tropicales [6]. No obstante, aún falta

organización en el sector, mejorar los procesos de producción y su regulación como actividad productiva, a la par de desarrollar conocimiento científico y tecnológico para el desarrollo de técnicas y procedimientos biotecnológicos para su producción *in vitro*, además, de realizar más estudios en otras especies silvestres [2].

El cultivo *in vitro* de hongos es un proceso que difiere de acuerdo con los requerimientos de cada especie, aunado a que se deben aislar de la competencia del mundo natural e implantarlo en un ambiente artificial que le dé al hongo una ventaja sobre otros organismos competidores. Pero muchos pasos son universales en el cultivo de todos los hongos y estos se reflejan directamente en su ciclo de vida [6] que se puede resumir de manera muy general en tres pasos como su puede ver en la Figura 3.



Figura 2. Cultivo de *Agaricus bisporus* (champiñón).

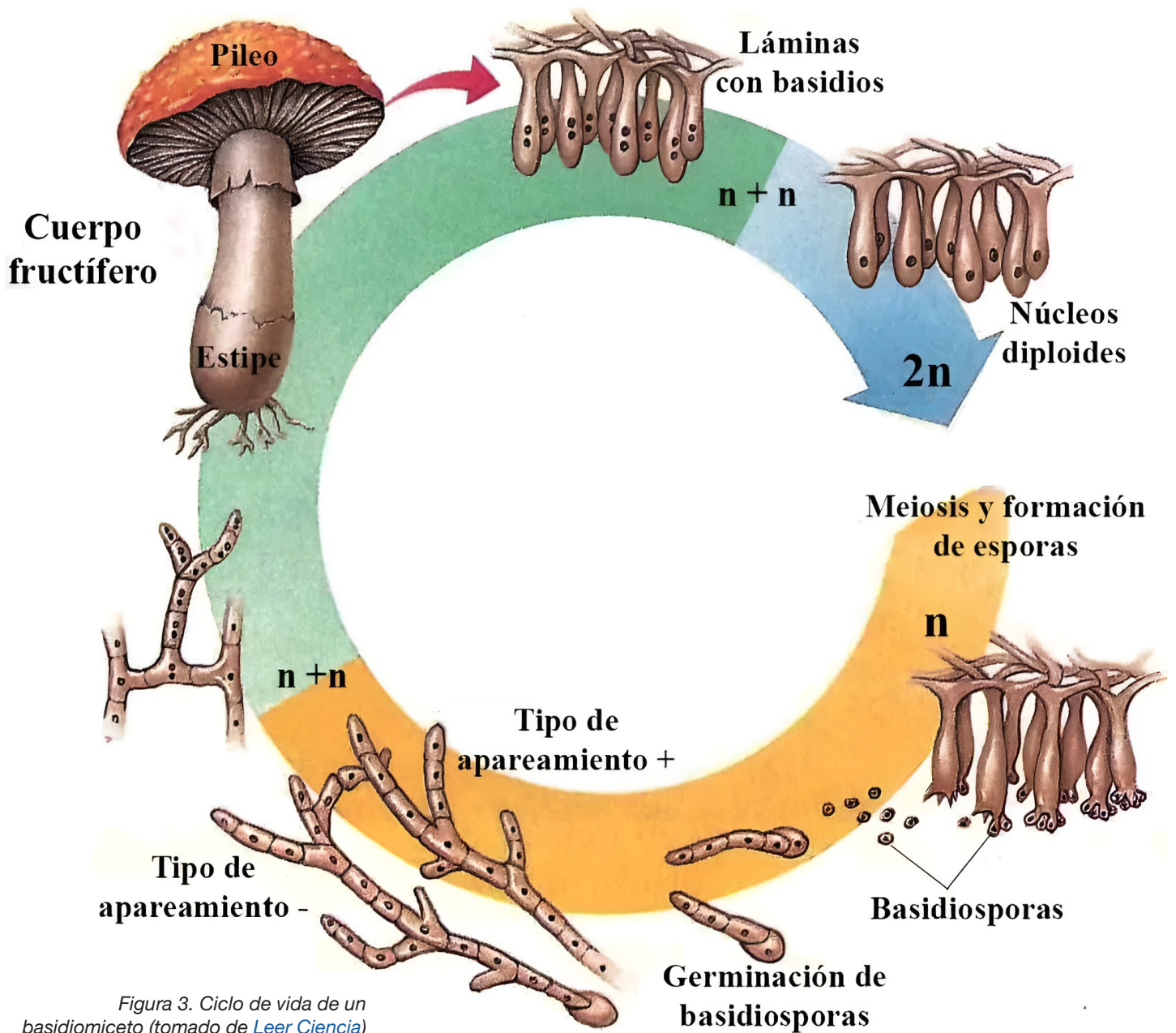


Figura 3. Ciclo de vida de un basidiomiceto (tomado de [Leer Ciencia](#))

1. Crecimiento vegetativo del micelio: las esporas germinan y se desarrollan dando origen a un micelio homocarión (n), el cual se une a hifas de otro micelio compatible mediante la plasmogamia y forman un micelio heterocariótico ($n+n$), el cual puede fructificar.
2. Formación de cuerpos fructíferos: el micelio heterocarión es capaz de crecer de forma indefinida y desarrollar cuerpos fructíferos cuando se expone a diversos factores como cambios de humedad y concentración de CO_2 .
3. Producción de esporas en los cuerpos fructíferos:

la cariogamia de los núcleos del micelio heterocarión ocurre en la punta de las hifas que forman la capa fértil del cuerpo fructífero (himenio). Posteriormente el núcleo $2n$ presenta meiosis y da origen a cuatro núcleos haploides (n) que migran hacia los esterigmas, para formar las esporas y repetir el ciclo.

En función al potencial biotecnológico que tienen los hongos para ser cultivados y obtener compuestos bioactivos, estos representan una alternativa para desarrollar nuevos tratamientos para la prevención y control de enfermedades prevalentes en la actualidad [3].

Propiedades biológicas de los hongos comestibles y compuestos bioactivos

En la literatura científica diversos trabajos sustentan que los hongos comestibles exhiben diversas propiedades benéficas para la salud humana, de hecho, en el acervo de la medicina tradicional mexicana se reconocen más de 70 especies de hongos medicinales (en su mayoría comestibles) para tratar alrededor de 40 enfermedades y padecimientos [2]. A la fecha se les han reportado diferentes actividades, por mencionar algunas [5]:

- Actividad inmunomoduladora, debido a que modifican la respuesta biológica, al activar receptores del sistema inmune innato como leucocitos, macrófagos, células asesinas naturales, entre otras.
- Efecto anticancerígeno y antitumoral, al desencadenar la actividad inmune y activar mensajeros químicos que inicializan la apoptosis de células tumorales, además de disminuir la expresión de la proteína E-selectina, que impide la adherencia de células tumorales.
- Tratamiento del síndrome metabólico (diabetes, obesidad, hiperlipidemia, hipercolesterolemia e hipertensión), ya que reducen los niveles de colesterol total, lipoproteínas de baja densidad, ayuda a la absorción de grasa en el tracto digestivo y regulan la glucemia (son considerados fibra soluble), aumentando la excreción de ácidos biliares y la exclusión de grasa fecal. Son una excelente alternativa para prevenir el desarrollo de enfermedades cardiovasculares.
- Efecto antimicrobiano (antibacteriano, antifúngico, antiviral y antiparasitario), se les atribuye esa propiedad debido a que ejercen diferentes mecanismos de acción sobre sus paredes celulares, conducen a la lisis celular y a la inhibición de nucleótidos y polimerasas involucradas en la replicación del ADN y en la transcripción de proteínas.
- Actividad antioxidante, debido a que ayudan a prevenir el daño al ADN eliminando

radicales libres, inhibiendo la peroxidación de lípidos y mejorado la actividad de las enzimas antioxidantes.

- Efecto curativo de heridas, puesto que al reunir macrófagos en el sitio de la herida y al aumentar la disponibilidad de colágeno, agilizan la cicatrización. Además, también desempeñan un papel clave en la inflamación al regular las plaquetas sanguíneas.

Las propiedades que brindan los hongos comestibles se deben sobre todo a los compuestos bioactivos presentes en sus estructuras, ya sea en cuerpos fructíferos y/o, micelio cultivado. Cabe mencionar que esos compuestos bioactivos reportan más de una actividad benéfica para la salud humana [7]. Algunos de estos compuestos incluyen:

- Polisacáridos como el lentinano (un β -glucano) con potencial anticancerígeno presente en el hongo Shiitake (*Lentinula edodes*).
- Glicoproteínas, por ejemplo, las lectinas presentes en especies como *Agaricus bisporus* y *Tricholoma mongolicum*, las cuales han demostrado inhibir la proliferación de células cancerígenas.
- Compuestos fenólicos como el ácido cafeico con actividad antioxidante y antiinflamatoria reportado en especies de alta demanda como *A. bisporus*, *Boletus edulis* y *Lactarius deliciosus*.
- Terpenos, los triterpenos presentes en *Ganoderma lucidum* reportan actividad antibacteriana antiinflamatoria y anticancerígena.
- Ácidos grasos (ácido linoleico, oleico y palmítico) que cumplen un rol importante en el metabolismo de lípidos y carbohidratos, y se encuentran presentes en la mayoría de las especies de hongos comestibles.
- Ergosterol que funge como precursor de la vitamina D utilizado para tratar el síndrome metabólico y como antiinflamatorio. Éste se encuentra presente en todos los hongos comestibles (es el equivalente al colesterol

en los humanos).

- Vitaminas C, E y carotenoides precursores de la vitamina A, con actividad antioxidante y que son esenciales para los hongos comestibles.
- Proteínas que funcionan como estructura en los hongos, y que tienen actividad antibacteriana al contener aminoácidos como leucina, isoleucina, tirosina y fenilalanina.

Cabe mencionar que cada especie de hongos comestibles tiene una composición diferente tanto en su estructura como en la concentración de compuestos bioactivos [5], por lo que las especies poco comunes y estudiadas son fuentes de interés para la investigación y desarrollo de nuevos tratamientos.

Obtención e identificación de compuestos bioactivos

Para la obtención de compuestos bioactivos es necesario realizar diversas técnicas que varían dependiendo de la naturaleza de cada compuesto, pero en general consisten inicialmente en un proceso de extracción y fraccionamiento, ya sea utilizando solventes orgánicos, o mediante degradaciones con ácidos o alcaloides; seguido por su purificación mediante filtraciones, precipitaciones o cromatografía. Finalmente, la identificación y caracterización de estructuras se realiza utilizando técnicas analíticas como espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis), espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) por sus siglas en inglés, Cromatografía Líquida de Alta Eficacia acoplado a Espectrometría de Masas (HPLC-MS) por sus siglas en inglés y Resonancia Magnética Nuclear (RMN) [7].

Existe una gran diversidad de compuestos bioactivos presentes en los hongos comestibles que han demostrado tener potencial para la elaboración de fármacos, como la lovastatina presente en *Pleurotus ostreatus*, utilizada para disminuir el colesterol y prevenir enfermedades cardiovasculares. Estos compuestos bioactivos también presentan poten-

cial en la elaboración de nutraceúticos, como el lentinan un β - glucano presente en el *Lentinula edodes* utilizado en el tratamiento contra el cáncer. Así como la elaboración de productos de valor agregado a base de hongos en la industria alimentaria, como los potenciadores de sabor y suplementos alimenticios basados en hongos deshidratados [1]. **iBIO**

Referencias

- [1] Kour, H., Kour, D., Kour, S., Singh, S., Hashmi, S. A. J., Yadav, A. N., Kumar, K., Sharma, Y. P. y Ahluwalia, A. S. (2022). Bioactive compounds from mushrooms: an emerging bioresources of food and nutraceuticals. *Food Bioscience*, 50 (2022), 102124. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102124>
- [2] Alvarado-Castillo, G., Mata, G., y Benítez-Badillo, G. (2015). Importancia de la domesticación en la conservación de los hongos silvestres comestibles en México. *Bosque*, 36(2), 151-161. <http://dx.doi:10.4067/S0717-92002015000200001>
- [3] Lu, H., Lou, H., Hu, J., Liu, Z., y Chen, Q. (2020). Macrofungi: A review of cultivation strategies, bioactivity, and application of mushrooms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(5), <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12602>
- [4] Ahlawat, O. P., Manikandan, K., y Singh, M. (2016). Proximate composition of different mushroom varieties and effect of UV light exposure on vitamin D content in *Agaricus bisporus* and *Volvariella volvacea*. *Mushroom Research*, 25(1), 1-8.
- [5] Assemie, A., y Abaya, G. (2022). The effect of edible mushroom on health and their biochemistry. *International journal of microbiology*, 2022, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2022/8744788>
- [6] Kalenius, R. (2022). *Mushroom cultivation in Temperate Agroforestry: potential Agroforestry practices, growing methods, and native edible saprophytes to Sweden*. Dept. of Biosystems and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences.
- [7] Cateni, F., Gargano, M. L., Procida, G., Venturella, G., Cirilincione, F., y Ferraro, V. (2021). Mycochemicals in wild and cultivated mushrooms: nutrition and health. *Phytochemistry Reviews*, 21, 339-383. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09748-2>



Hot Science

Optimizando la protección solar con *Anabaena variabilis*

Micosporinas como una alternativa de filtro solar

Daniela Fernanda Suárez-Bernal
Paula Marroquín-Morales
Samantha Carrillo-Rosas
Claudia Caballero-Cerón*

Escuela de Ingeniería y Ciencias del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México.

*Autor para la correspondencia: c.caballero@tec.mx

Resumen

Los protectores solares son fundamentales para prevenir daños en la piel causados por exposición a rayos UV. Sin embargo, los protectores solares comerciales contienen ingredientes que pueden afectar la salud y el ambiente. Por esto, se propone considerar los protectores solares biológicos con compuestos obtenidos de organismos marinos, como los aminoácidos de tipo micosporina (MAAs). Estos ofrecen protección contra los rayos UV, entre otros beneficios. Para producirlos, se sugiere utilizar fotobiorreactores tubulares debido a su capacidad y estabilidad. Por lo que se sugiere implementar el uso de protectores solares biológicos como una alternativa innovadora en el cuidado de la piel.

Palabras clave: protector, MAAs, fotobiorreactor.

tivos al material genético, envejecimiento prematuro y predisposición al cáncer de piel.

Uno de los principales daños oxidativos causados por la exposición a rayos UV-A/UV-B, es el melanoma de piel que según el World Cancer Research Fund, en 2020 fue el 17° cáncer más común en el mundo con 324,635 nuevos casos. De acuerdo con la Secretaría de Salud del Gobierno de México, en el país cada año se detectan cerca de mil casos de cáncer de piel y una manera de prevenirlo es utilizar protector solar para la piel.

Los protectores solares son productos cosméticos que contienen filtros UV para proteger la piel y minimizar los daños. Por su lado, los filtros solares son sustancias que tienen un espectro de absorción de luz en el rango de luz ultravioleta (UV-B y UV-A), que va de 280 - 315 nm y de 315 - 400 nm respectivamente [1]. Dependiendo de su origen y características, se pueden dividir en inorgánicos, orgánicos y biológicos [2]. Los inorgánicos tienen origen mineral, no absorben los rayos solares y se activan al contacto con la piel [2]. Por otro lado, los orgánicos en su mayoría tienen carácter sintético y se activan por radiación UV, lo que induce su absorción [3]. Por último, los biológicos son sustancias protectoras contra radiación UV y

La piel es una barrera física que cubre por completo el cuerpo humano y presenta múltiples funciones: protector térmico, impide el ingreso de microorganismos, se encarga de mantener y regular la temperatura corporal, almacena agua y productos metabólicos. Sin embargo, cuando la piel es expuesta de forma directa a los rayos UV-B y de forma indirecta a los rayos UV-A, el ADN sufre daños por la formación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), que son radicales libres que provocan daños oxida-

estrés oxidativo al evitar formación de radicales libres [2].

Actualmente, los protectores solares comerciales utilizan filtros, dentro de los cuales están los orgánicos como benzofenona-3 (oxibenzona) y derivados de dibenzilmetano, como la avobenzona [3]. Estos contienen cetonas aromáticas que no son fácilmente reconocidas por las enzimas metabólicas en humanos, lo que induce reacciones alérgicas y tóxicas [3]. También usan filtros inorgánicos como dióxido de titanio y óxido de zinc, que depende de la forma farmacéutica su toxicidad en el cuerpo [2]. Igualmente es importante considerar su impacto ambiental, ya que algunos de sus ingredientes han sido detectados en el agua por su baja solubilidad y persisten a tratamientos para aguas residuales por sus altas propiedades lipofílicas [4].

En la Figura 1 se muestra una comparación entre protectores solares comerciales y biológicos, demostrando que ambos ofrecen características beneficiosas. También se menciona que los protectores solares biológicos son más difíciles de conseguir por su poca disponibilidad en el mercado. Sin embargo, algunas diferencias resaltadas son las principales causantes de los problemas previamente mencionados.

Es por estas problemáticas que se propone evaluar la viabilidad de protectores solares con compuestos no sintéticos que brinden protección contra radiación UV. Una opción son los aminoácidos de tipo micospolina (MAAs por sus siglas en inglés), los cuales se pueden obtener mediante organismos marinos, como microalgas o cianobacterias [5]. Como se muestra en la Figura 2, los MAAs son derivados imino-carbonil del cromóforo de ciclohexenona

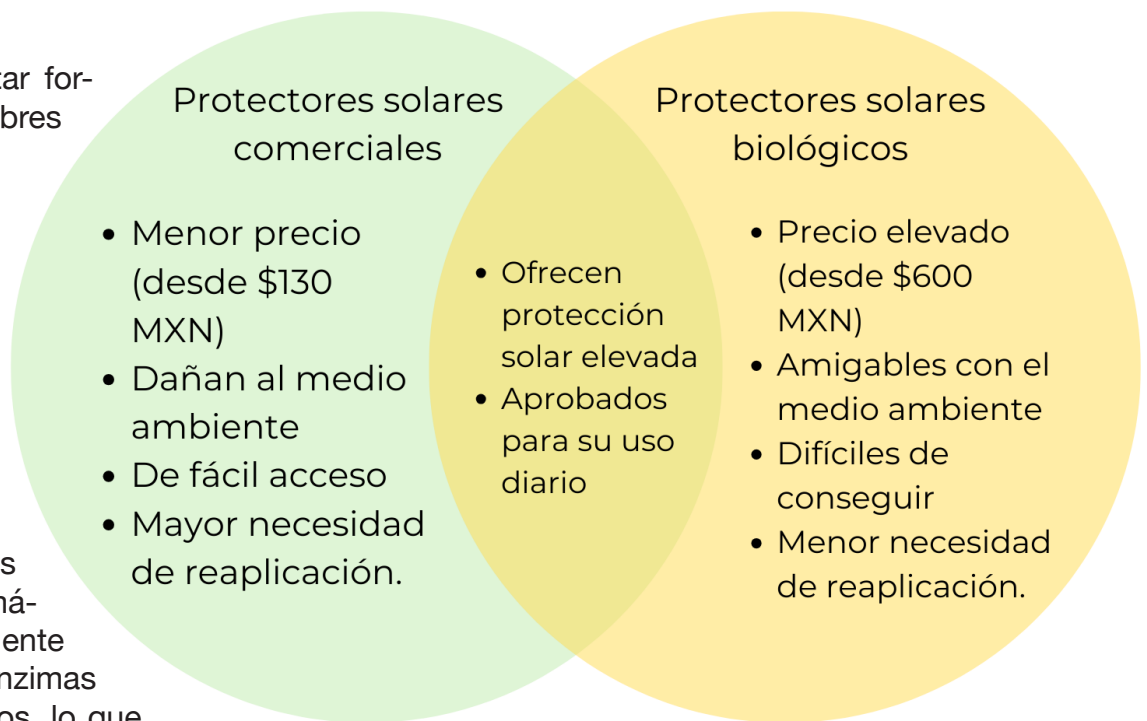


Figura 1. Diagrama de Venn mostrando diferencias y similitudes entre protectores solares comerciales y biológicos.

de las micosporinas [6] y cuentan con la capacidad de absorber los rayos UV, además, poseen propiedades antioxidantes, anti-inflamatorias y anti-envejecimiento [5]. Estas funciones se han comprobado en cianobacterias después de condiciones de estrés, tales como radiación solar intensa, desecación y altas temperaturas [5]. Adicionalmente, esta inducción bajo estrés ha demostrado que los MAAs tienen otras funciones, ya que pueden disipar la radiación absorbida como calor sin producir ROS [5]. Finalmente, se ha comprobado que los MAAs tienen protección contra rayos UV-A y UV-B, demostrando que pueden ofrecer niveles de Factor de Protección Solar similares a los protectores solares comerciales [5].

En la Figura 3, se presenta la comparación de las interacciones de los rayos UV-A/UV-B contra filtros solares físicos, químicos y biológicos, afirmando así que los protectores biológicos se pueden considerar como una alternativa eficiente. Esto demostrado en el estudio realizado por De la Coba *et al.* [7], donde se comparó una formulación base sin MAAs, contra una formulación con MAAs y, basándose en el sistema de puntuación Draize (donde 0 repre-

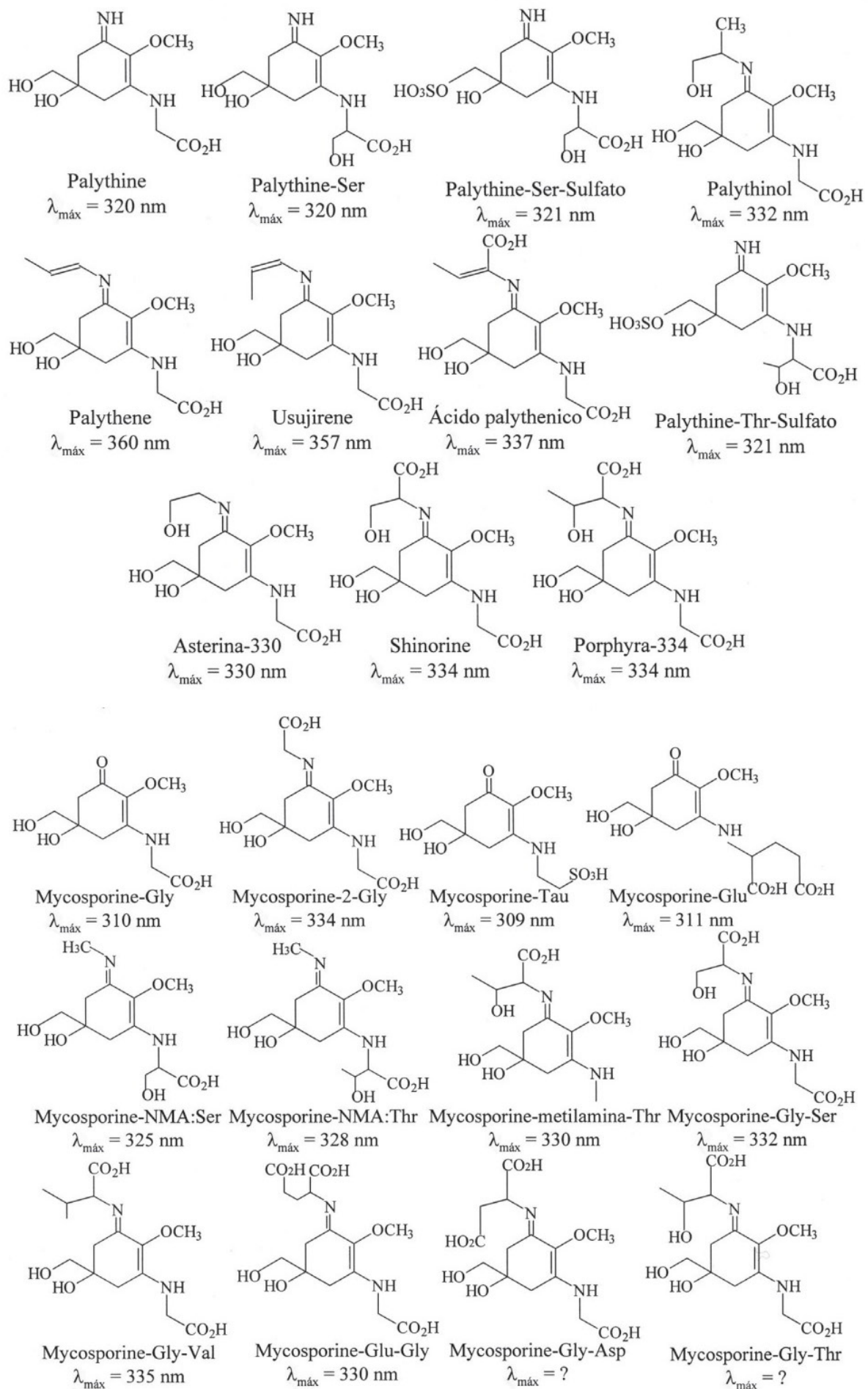


Figura 2. Estructuras químicas y máximos de absorción de los 23 MAAs identificados en organismos acuáticos [6].

senta piel no irritada y sin eritema, 3 representa edema severo y 4 representa, piel no tratada, irradiada y altamente enrojecida), después de 6 horas de exposición UV, la piel tratada con la formulación base obtuvo un puntaje de 4, mientras que la piel tratada con los MAAs mostró una puntuación media para eritema de 2.

Un problema común es la necesidad de reaplicación del protector solar de manera constante para mantener su efecto. La Organización Mundial de la Salud reportó en 2003 que la mayoría de los protectores solares comerciales necesitan una reaplicación cada 2 horas para mantener protección óptima. Por su lado, los MAAs presentan fotoestabilidad, ya que se demostró que el 75% de los MAAs iniciales permanecen estables hasta 4 horas después de exposición continua a los rayos sola-

res [8]. Esto muestra una degradación lenta, lo que sugiere menor necesidad de reaplicación a lo largo del día, manteniendo una protección óptima comparado con los protectores solares comerciales.

Comercialmente se encuentra Helioguard 365 de Mibelle Biochemistry y Helionori de Biosil Technologies. Estos productos contienen extractos de MAAs provenientes del alga roja *Porphyra umbilicalis* [9]. Por un lado, Helioguard 365 contiene MAAs encapsulados en liposomas, aumentando la firmeza y suavidad en la piel [9]. Por otro lado, Helionori es fotoestable y estable al calor, reduciendo quemaduras solares y preservando los lípidos en la membrana [9]. Sin embargo, al extraer *P. umbilicalis* de su hábitat natural, se altera el ecosistema, por lo que una alternativa para la producción

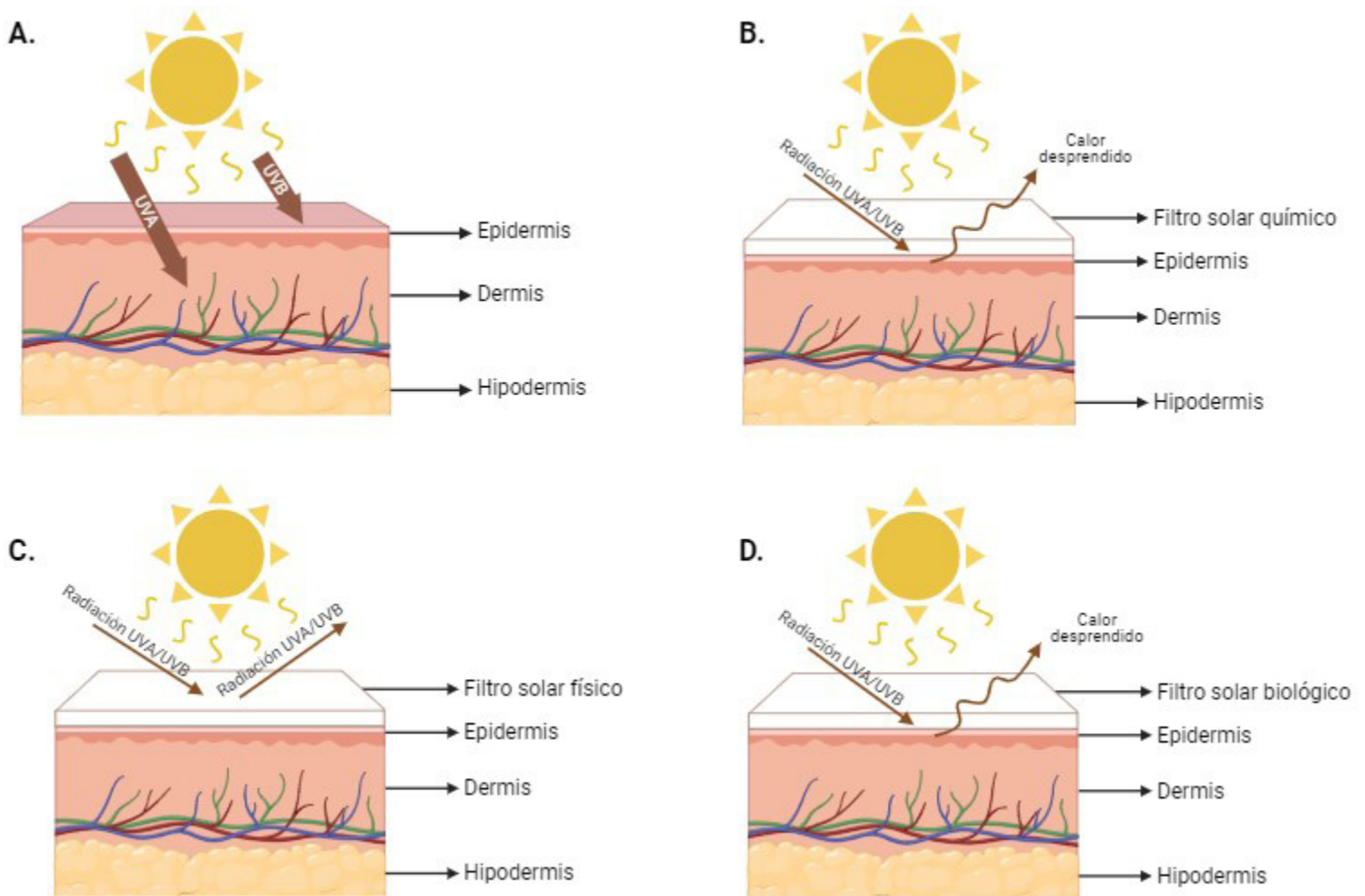


Figura 3. A. Interacción de los rayos UV-A y UV-B con la piel sin protección solar. B. Interacción de los rayos UV-A/UV-B con la piel con un filtro solar físico. C. Interacción de los rayos UV-A/UV-B frente a un filtro solar químico. D. Interacción de los rayos UV-A/UV-B con un filtro solar biológico. Creado con BioRender.

de MAAs son las cianobacterias. No hay diferencias reportadas entre los MAAs de *P. umbilicalis* y cianobacterias y se han comenzado a estudiar los beneficios ambientales de utilizar las cianobacterias como alternativa viable para la obtención de MAAs [9]. Las cianobacterias son organismos marinos de interés en el área biotecnológica por su capacidad de producir metabolitos secundarios, como los MAAs.

Para producir los MAAs, es necesario establecer un bioproceso, el cual es un proceso en el que se utilizan células o microorganismos vivos para generar un producto. El equipo principal es el biorreactor, que brinda un medio ambiente controlado que da paso al crecimiento del microorganismo y a la formación del producto de interés. Estos equipos se pueden operar de manera continua para optimizar la producción y cosecha de biomasa, lo que implica una alimentación continua de medio nutritivo fresco, mientras que hay una descarga de masa equivalente, incluyendo medio consumido y biomasa. Dado que la tasa de crecimiento máxima de las cianobacterias se alcanza des-

pues de 6 días, este proceso es ideal para microorganismos con rendimiento bajo, como la cianobacteria *Anabaena variabilis* PCC 7939, ya que permite aumentar la productividad y mantener la tasa de crecimiento en un nivel óptimo para la obtención del producto de interés.

Específicamente para la obtención de MAAs por *A. variabilis* PCC 7939, se sugiere la implementación de fotobiorreactores tubulares tipo *airlift*, utilizando tubos de vidrio de borosilicato, como se muestra en la Figura 4. Los biorreactores tipo *airlift* permiten el paso vertical del flujo. Además, los tubos permiten el paso de la luz y cuentan con un rociador que convierte el gas en burbujas. Ofrecen estabilidad contra rayos UV y alojan más volúmenes fotoactivos de solución de cultivo en un área determinada que otros métodos. Otra de sus ventajas es que ofrece menor evaporación que los sistemas abiertos, lo que brinda mayor rendimiento, aparte de que ofrecen mejor control sobre condiciones de pH, temperatura, luz y concentración de CO_2 [10]. Los fotobiorreactores tubulares circulan el cultivo a través de

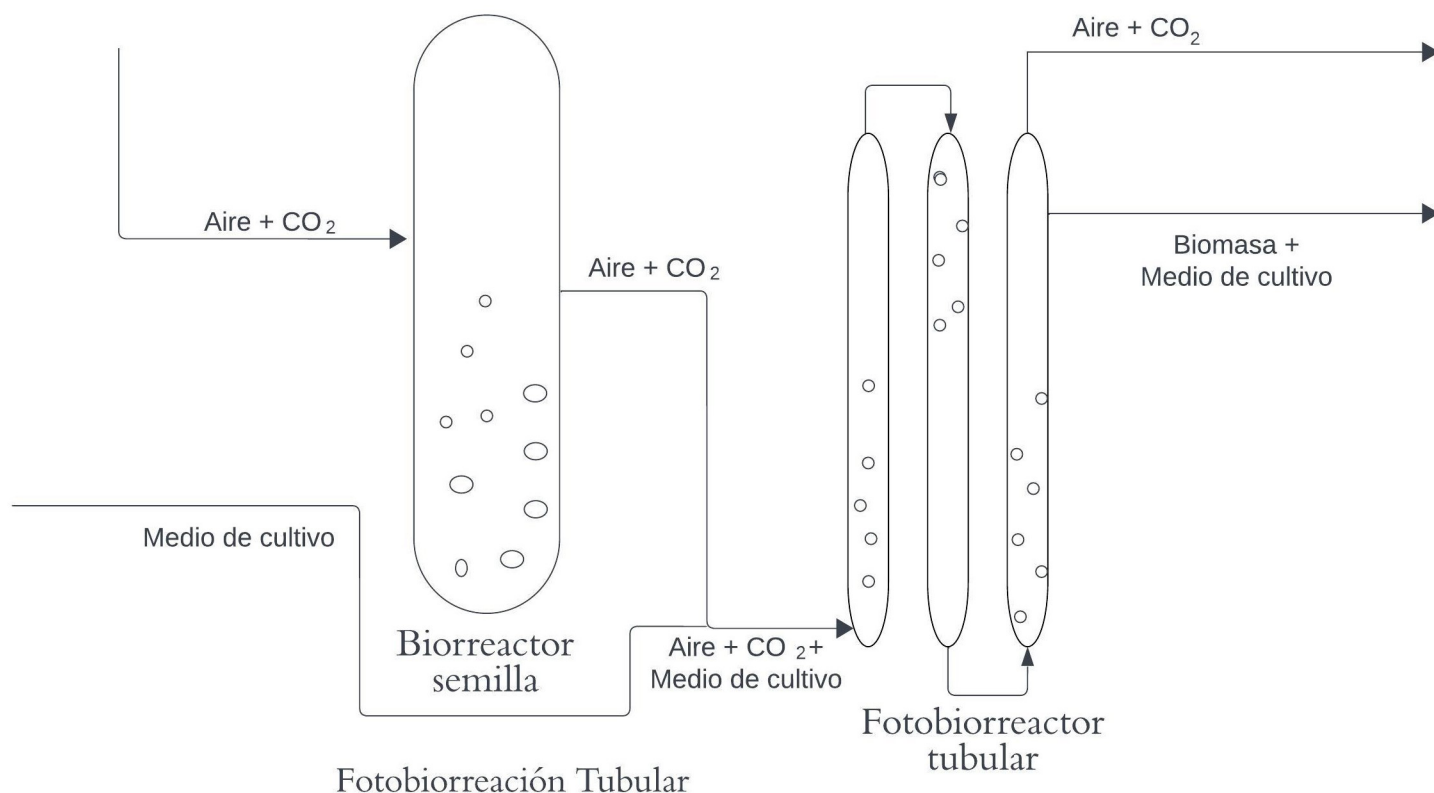


Figura 2. Diagrama representativo del fotobiorreactor tubular. Imagen diseñada en Lucidchart.

dispositivos de transporte de aire, evitando el daño celular que se asocia al bombeo mecánico. Esto debido a que los reactores *airlift* son adecuados para el cultivo de células sensibles gracias a sus bajos esfuerzos de corte.

Por su ubicación geográfica, México recibe una radiación solar alta, lo que provoca una demanda alta de protectores solares. Tomando como base la demanda de empresas PyME (Pequeñas y Medianas Empresas) dentro del mismo sector, para desarrollar un protector solar biológico, es necesario tener la capacidad de producir 600 - 650 protectores al mes. Se propone utilizar *A. variabilis* ya que no es necesario una modificación genética para la producción de MAAs. Para una producción a ese nivel, el fotobiorreactor deberá tener un volumen de 12,666.66 L, por lo que se necesitan 800 tubos con capacidad de 15.85 L c/u. Utilizando *A. variabilis* se espera tener un rendimiento de biomasa de 8 g/L de medio tras 6 días de cultivo y un rendimiento de MAAs de 3.27 mg/g de biomasa seca.

En conclusión, la piel es un órgano multifuncional que cumple roles cruciales en la protección del cuerpo. Su exposición a los rayos UV-B y UV-A resulta en daños al ADN, para prevenirlos, se han desarrollado protectores solares con filtros orgánicos e inorgánicos para absorber y bloquear la radiación dañina. Sin embargo, algunos de sus componentes pueden tener efectos perjudiciales en la salud y medioambiente. Una alternativa prometedora es el uso de protectores solares biológicos con MAAs como filtro solar. Estos, absorben rayos UV, poseen propiedades favorables para la piel y presentan mayor fotoestabilidad en comparación con los filtros solares tradicionales, lo que implica una menor necesidad de reaplicación durante el día, revolucionando la industria de protectores solares. **iBIO**

Referencias

[1] Schmid, D., Schürch, C., & Züllli, F. (2006). Mycosporine-like amino acids from red algae protect against

premature skin-aging. *Euro Cosmet*, 9, 1-4.

[2] Santander Ballestín, S., & Luesma Bartolomé, M. (2023). Toxicity of Different Chemical Components in Sun Cream Filters and Their Impact on Human Health: A Review. *Applied Sciences*, 13(2), 712. <https://doi.org/10.3390/app13020712>

[3] Jesús, A., Sousa, E., Cruz, M., Cidade, H., Lobo, J., & Almeida, I. (2022). UV Filters: Challenges and Prospects. *Pharmaceuticals*, 15(3), 263. <https://doi.org/10.3390/ph15030263>

[4] Balmer, M. E., Buser, H. R., Müller, M. D., & Poiger, T. (2005). Occurrence of some organic UV filters in wastewater, in surface waters, and in fish from Swiss lakes. *Environmental science & technology*, 39(4), 953-962.

[5] Singh, A., Čížková, M., Bišová, K., & Vítová, M. (2021). Exploring Mycosporine-Like Amino Acids (MAAs) as Safe and Natural Protective Agents against UV-Induced Skin Damage. *Antioxidants* (Basel, Switzerland), 10(5), 683. <https://doi.org/10.3390/antiox10050683>

[6] Korbee, N., Figueroa, F. L., & Aguilera, J. (2006). Acumulación de aminoácidos tipo micospolina (MAAs): Biosíntesis, fotocontrol y funciones ecofisiológicas. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(1). <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000100010>

[7] De la Coba, F., Aguilera, J., de Gálvez, M. V., Álvarez, M., Gallego, E., Figueroa, F. L., & Herrera, E. (2009). Prevention of the ultraviolet effects on clinical and histopathological changes, as well as the heat shock protein-70 expression in mouse skin by topical application of algal UV-absorbing compounds. *Journal of Dermatological Science*, 55(3), 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2009.06.004>

[8] Whitehead, K., & Hedges, J. I. (2005). Photodegradation and photosensitization of mycosporine-like amino acids. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 80(2), 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2005.03.008>

[9] Soule, T., & Garcia-Pichel, F. (2013). Ultraviolet photoprotective compounds from cyanobacteria in biomedical applications. In *Cyanobacteria: An Economic Perspective* (eds N.K. Sharma, A.K. Rai and L.J. Stal). pp. 119-143. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118402238.ch8>

[10] Ramírez Mérida, L. G., Jacob-Lopes, E., & Queiroz Zepka, L. (2014). FOTOBIORREACTOR: HERRAMIENTA PARA CULTIVO DE CIANOBACTERIAS. *Ciencia Y Tecnología*, 6(2), 9-19. <https://doi.org/10.18779/cyt.v6i2.132>

A top-down photograph of various fruits and pills on a light-colored, weathered wooden surface. On the right side, there is a whole red and yellow apple, a green pear, a sliced orange, a sliced blood orange, and a sliced kiwi. On the left side, there is a vertical arrangement of numerous pills in various colors including yellow, orange, red, pink, and light green. The word 'Concientifica' is written in a large, white, sans-serif font across the center of the image.

Concientifica

¡UN ARCOÍRIS VEGETAL!

Alimentos coloridos que impactan en tu salud

Elsa Díaz-Montes

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Barrio La Laguna Ticomán, Ciudad de México 07340, México.

elsadimo123@gmail.com

Resumen

Durante años hemos elegido alimentos naturales como frutas, verduras, plantas y tubérculos, por el arte culinario que se puede hacer con su gama de colores. Estos colores se deben a pigmentos naturales como las betalainas, carotenoides, clorofilas y flavonoides. Además de dar color, gran parte de los pigmentos naturales se consideran compuestos bioactivos por sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antibacterianas, antiinflamatorias y anticancerígenas, que generan beneficios en la salud. Es por ello, que al consumir alimentos coloridos se puede apreciar su belleza y al mismo tiempo obtener un efecto positivo en el organismo.

Palabras clave: alimentos naturales, pigmentos naturales, beneficios a la salud.

¿Qué son los pigmentos naturales y dónde se obtienen?

Los pigmentos naturales son parte de los aditivos alimentarios utilizados como ingredientes para dar color en la industria de alimentos y bebidas. Debido a su origen natural, estos compuestos son biodegradables, ofrecen una amplia gama de colores y son considerados seguros para el consumo humano [1].

Los pigmentos naturales se pueden clasificar según su fuente de obtención, como se muestra en la Figura 1. Esta clasificación incluye pigmentos de origen vegetal, animal, mineral y microorganismos. Todos los vegetales (por ejemplo, flores, frutas, hojas, semillas y granos)

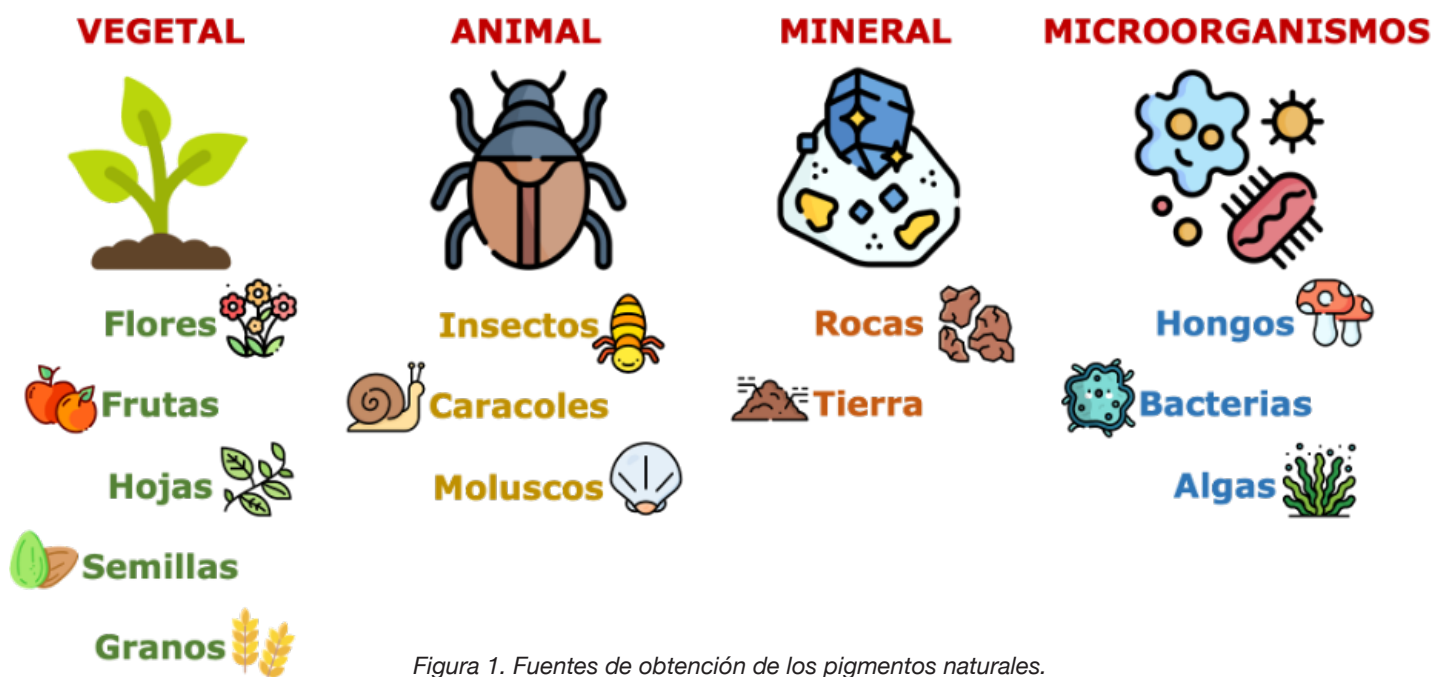


Figura 1. Fuentes de obtención de los pigmentos naturales.

y los animales con coraza o caparazón (por ejemplo, insectos, caracoles y moluscos) son ricos en pigmentos naturales. Las rocas y tierra con una composición alta en minerales también son fuente de pigmentos naturales. Además, los hongos, las bacterias y algas pueden producir pigmentos naturales gracias a su metabolismo o se puede promover su síntesis bajo condiciones de cultivo controladas (por ejemplo, luz, oscuridad, sustratos y tiempos de incubación). No obstante, entre todos estos tipos de pigmentos naturales se ha prestado mayor atención a los pigmentos obtenidos del reino vegetal debido a su disponibilidad y facilidad de obtención [2].

¿Qué alimentos tienen pigmentos naturales?

La ingesta de alimentos se erige como la principal fuente de pigmentos naturales con propiedades bioactivas. Estos pigmentos se dividen en cuatro categorías principales: betalaínas, carotenoides, clorofilas y flavonoides [3]; tal como se ilustra en la Figura 2.

Las betalaínas se presentan en tonalidades que van desde el amarillo/naranja hasta el rojo/púrpura, y se encuentran en el amaranto, los champiñones, el betabel, los xoconostles, las tunas moradas y las pitayas. Los carotenoides, por su parte, aportan una gama de colores amarillos, naranjas y rojos; que se encuentran en alimentos como el maíz, los pimientos amarillos, los mangos, los duraznos, las zanahorias, las calabazas, las papayas, los pimientos rojos, los jitomates y las granadas. Las clorofilas, por su parte, son los pigmentos más abundantes en la naturaleza y se caracterizan por sus tonalidades verdes, que van desde el verde claro hasta el verde oscuro; son fácilmente identificables en diversas plantas, hierbas y frutas verdes, como las espinacas, el brócoli, las acelgas, la lechuga, el cilantro, el perejil, los chicharos, el kiwi, el pimiento verde y las aceitunas. Finalmente, los flavonoides con-

tribuyen a los colores amarillo/blanco, amarillo/verde, amarillo/marrón, rosa/purpura y azul/morado, y se encuentran en alimentos como las cebollas, los limones, las manzanas amarillas, las fresas, las frambuesas, los arándanos, las uvas moradas, las zanahorias negras, la col morada y las berenjenas. Sin embargo, es importante mencionar que los alimentos vegetales se componen de más de un pigmento, y su cantidad varía dependiendo de su etapa de madurez, condiciones de cultivo y variedad [3].

¿Cómo ayudan los pigmentos naturales en la salud humana?

Los pigmentos naturales de origen vegetal se consideran compuestos bioactivos debido a que sus propiedades promueven la salud de quienes los consumen [1]. En la Figura 3 se muestran los compuestos bioactivos clasificados como pigmentos naturales.

Las propiedades bioactivas dependen del tipo de pigmento del que se trate [1]. Por ejemplo, las betalaínas son conocidas por su capa-

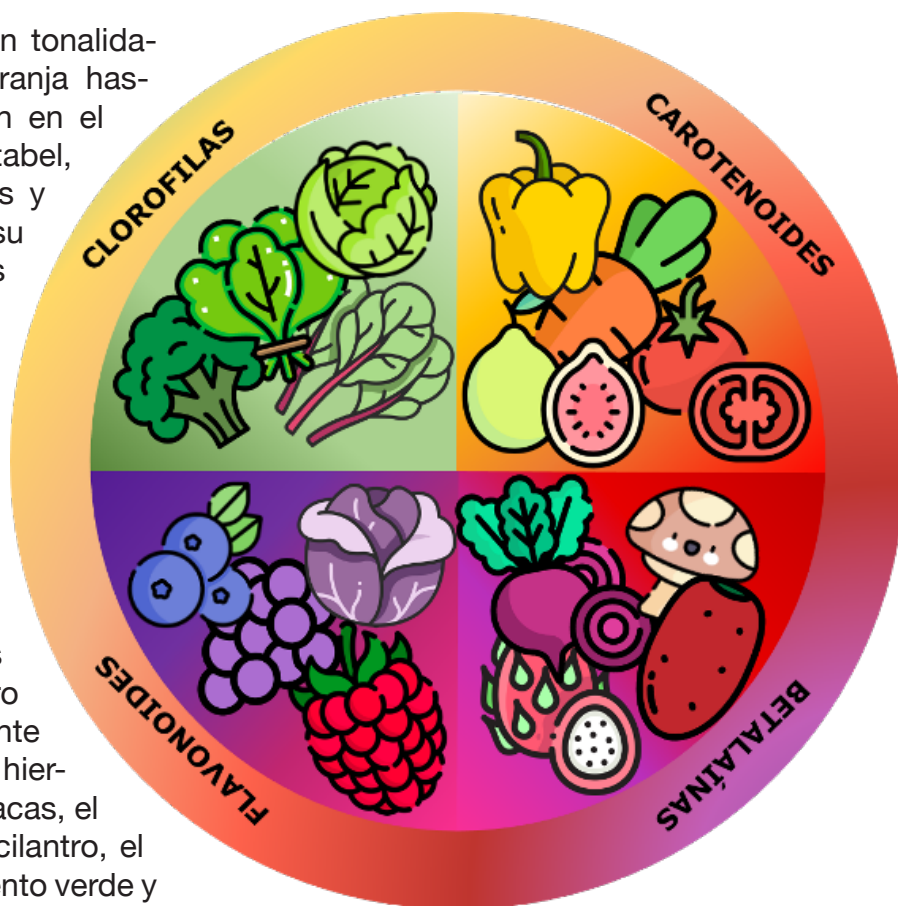


Figura 2. Clasificación de los pigmentos vegetales.

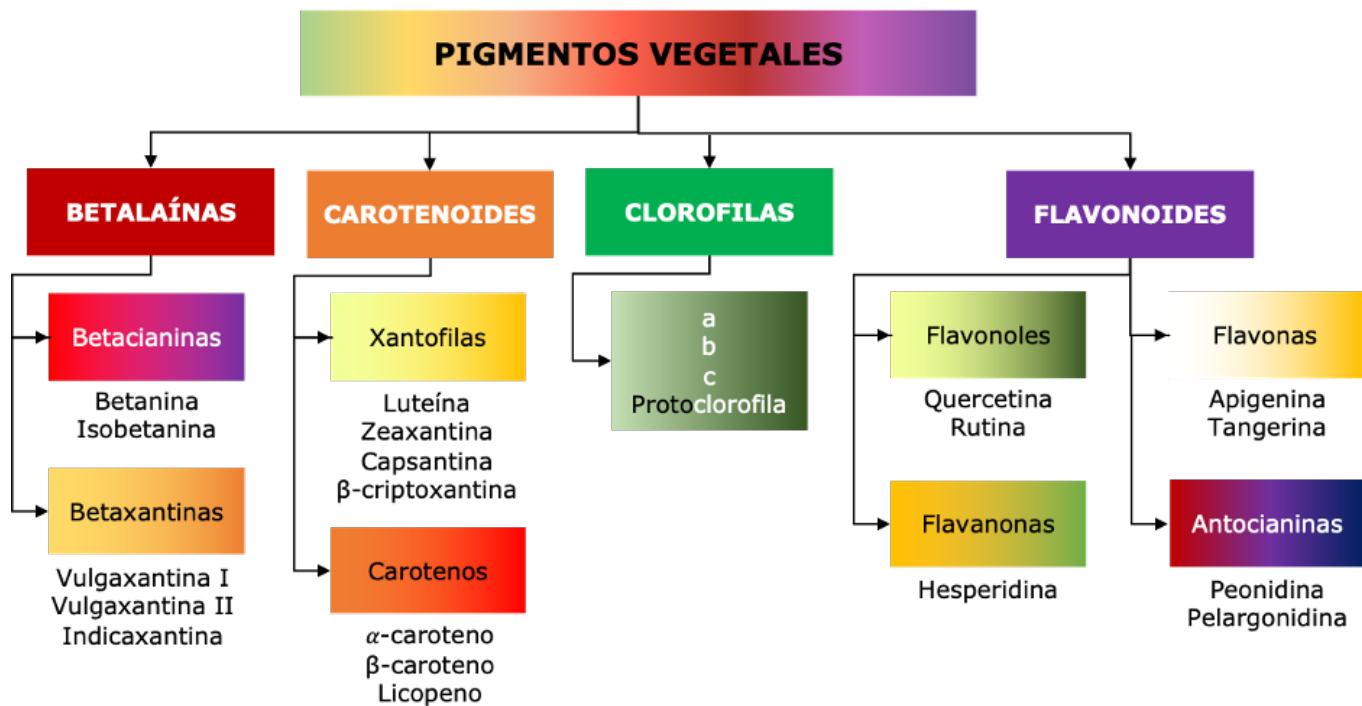


Figura 3. Compuestos bioactivos clasificados como pigmentos naturales.

idad antioxidante, lo que significa que pueden ayudar a neutralizar los radicales libres y contribuir a contrarrestar el envejecimiento y el desarrollo de enfermedades crónicas relacionadas con el estrés oxidativo. Además, se ha demostrado que tienen propiedades antiinflamatorias, lo que las convierte en aliadas potenciales en la lucha contra enfermedades como la artritis, las enfermedades cardíacas y ciertos tipos de cáncer. Estos pigmentos también pueden ayudar a reducir la presión arterial, lo que disminuye el riesgo de enfermedades del corazón y accidentes cerebrovasculares. Se ha observado que mejoran la salud de los vasos sanguíneos, promoviendo una circulación sanguínea óptima y protegiendo la integridad de las paredes arteriales. Además de estos beneficios, las betalainas pueden desempeñar un papel importante como prebióticos, ayudando a mantener una flora intestinal equilibrada y saludable, lo que a su vez puede contribuir a reducir los trastornos digestivos [4].

Los carotenoides han demostrado tener propiedades antioxidantes, lo que significa que pueden ayudar a prevenir el desarrollo y la propagación de células cancerosas en el cuerpo. Se ha observado una asociación entre los carotenoides y una disminución del riesgo de

cáncer de próstata, pulmón y estómago. Los carotenoides desempeñan un papel importante en la salud cardiovascular. Ayudan a reducir los niveles de colesterol “malo” (LDL: lipoproteínas de baja densidad), previenen la formación de placas en las arterias y mejoran la función endotelial, lo que contribuye a mantener unas arterias sanas y flexibles. En términos de salud digestiva, los carotenoides estimulan la producción de enzimas digestivas y favorecen un equilibrio saludable de las bacterias intestinales, promoviendo una digestión más eficiente y una absorción adecuada de nutrientes. Además de estos beneficios, los carotenoides también mejoran la elasticidad y la hidratación de la piel, lo que contribuye a una apariencia juvenil [5].

Las clorofilas han demostrado tener propiedades que inhiben la proliferación de células cancerosas y promueven la apoptosis, la muerte celular programada, especialmente en cánceres de colon y de hígado. Además, ofrecen efectos benéficos en la salud cardiovascular al ayudar a reducir los niveles de triglicéridos en la sangre. Asimismo, protegen contra la oxidación del colesterol y la formación de placas en las arterias, contribuyendo a mantener un flujo sanguíneo adecuado. Tienen la capacidad de



Imagen tomada de [Flavorix. Aromáticos, S.A.](#)

estimular la producción de enzimas digestivas, lo que facilita la descomposición y absorción de nutrientes en el sistema digestivo. Además, las clorofilas poseen propiedades que pueden ayudar a eliminar toxinas y metales pesados del cuerpo [6].

Los flavonoides son conocidos por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, lo que los convierte en poderosos protectores contra varios tipos de cáncer, como el de colon, mama y próstata. Ayudan a reducir la presión arterial, mejorar la función de los vasos sanguíneos y reducir la inflamación en el sistema cardiovascular. También contribuyen a la reducción de los niveles de LDL y previenen la formación de coágulos sanguíneos, lo que disminuye el riesgo de enfermedades cardíacas y accidentes cerebrovasculares. Estimulan la producción de enzimas digestivas y actúan como prebióticos, facilitando la descomposición y absorción de nutrientes en el tracto gastrointestinal. Además, los flavonoides pueden estimular la producción y la actividad de las células del sistema inmunitario, mejorando así nuestra respuesta inmunológica ante infecciones y enfermedades [5].

Conclusión

Los pigmentos naturales se han distinguido por su amplia gama de colores y sus diversas fuentes de obtención. Sin embargo, se ha prestado mayor atención a los pigmentos de origen vegetal debido a su abundancia en la naturaleza. Además de proporcionar color, los pigmentos vegetales son reconocidos por sus

propiedades bioactivas, como antioxidantes, antimicrobianos, antibacterianos, antiinflamatorios y anticancerígenos, que ofrecen beneficios para la salud.

La próxima vez que te sirvas de comer, recuerda que los colores en tu plato no solo añaden belleza, sino también múltiples beneficios para tu salud. Opta por una variedad de alimentos coloridos para aprovechar los componentes bioactivos que te ofrecen.

¡Saborea el arcoíris en cada comida! **iBIO**

Referencias

- [1] Paillière-Jiménez, M.E., Stincone, P., & Brandelli, A. (2020). Natural Pigments of Microbial Origin. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, 1-8. <https://doi.org/10.3389/fsu-fs.2020.590439>
- [2] Singh, T., Pandey, V.K., Dash, K.K., Zanwar, S., & Singh, R. (2023). Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing. *J. Agric. Food Res.* 12: 100628. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100628>
- [3] Dikshit, R., & Tallapragada, P. (2018). *Comparative study of natural and artificial flavoring agents and dyes.* En *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes*; Grumezescu, A.M., & Holban, A.M., Eds.; Elsevier Inc.; pp. 83-111. ISBN 978-0-12-811518-3.
- [4] Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2021). Biological properties and applications of betalains. *Molecules.* 26: 1-36. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>
- [5] Lu, W., Shi, Y., Wang, R., Su, D., Tang, M., Liu, Y., & Li, Z. (2021). Antioxidant activity and healthy benefits of natural pigments in fruits: A review. *Int. J. Mol. Sci.* 22 (9): 4945. <https://doi.org/10.3390/ijms22094945>
- [6] Mishra, V.K., Bacheti, R.K., & Husen, A. (2011). *Medicinal uses of chlorophyll: A critical overview.* En: *Chlorophyll: Structure, Function and Medicinal Uses*; Le, H. & Salcedo, E., Eds.; Nova Science Publishers, Inc.; pp.177-196. ISBN 978-1- 62100-015-0.



Micro- bichos

Inóculos fermentativos: ¿De qué sabor vas a querer tu chocolate?

Resumen

La fermentación espontánea y tradicional de cacao es un proceso que involucra consorcios microbianos como levaduras, bacterias ácido-lácticas y acéticas. Estos microorganismos se encargan de producir compuestos precursores de aroma y sabor para el cacao. Este tipo de proceso suele generar resultados heterogéneos en cuanto al perfil organoléptico del grano, al recibir la carga microbiana en un sistema no controlado. Los inóculos en fermentaciones de cacao son la oportunidad para dirigir fermentaciones espontáneas, lograr uniformidad y perfiles especiales de aromas que permitirán diferenciar lotes de cacao fermentado en el mercado del chocolate.

Palabras clave: fermentación, inóculo, cacao.

Alguna vez te has preguntado ¿Por qué hay personas que les gustan los chocolates amargos (con alto contenido de cacao)? ¿Acaso te estas perdiendo de un mundo de sabores más allá del amargo? ¡Pues he de decirte que sí! Y las respuestas están en la fermentación de los granos de cacao, la principal materia prima de los chocolates.

Para empezar los granos de cacao provienen de un árbol de la especie *Theobroma cacao* L., y dan como frutos unas mazorcas del tamaño de un pepino, con colores bastante llamativos que van desde amarillo a verde y rojo. Y esto puede deberse a que existen diferentes variedades de esta especie de cacao, aunque de manera general se ubican con los términos de cacao tipo Criollo, Forastero y Tri-

Dulce del Carmen Velásquez Reyes¹
Manuel R. Kirchmayr²
Anne Gschaedler Mathis^{2*}

¹Tecnología alimentaria. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.,
45019 Zapopan, Jal.

²Biotechnología industrial. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.,
45019 Zapopan, Jal.

*Autor para la correspondencia: agchaedler@ciatej.mx

nitario. El de tipo Criollo es un cacao que lo conocen como fino de aroma o blanco, debido a que sus granos son de color blanco y se utiliza en chocolaterías estilo gourmet. Por otro lado, tenemos al tipo Forastero que es un cacao con alto contenido de taninos, sus granos son de color morado y es muy amargo, pero a su favor tiene que es muy resistente a enfermedades del campo. El Trinitario el cual puede considerarse como una mezcla entre ambos, ya que presenta características del Criollo, pero también del Forastero, por tanto, sus granos pueden ser de color morado como blanco [1].

Lo interesante del cacao se encuentra en su interior, ya que, al romperlas las mazorcas, ya sea con una piedra, entre ellas mismas o con un machete, debido a que su corteza es bastante dura, se encuentran los granos de cacao listos para fermentarse [1]. Algo curioso de los granos de cacao es que están recubiertos de una pulpa que sabe a un coctel de frutas como maracuyá, lichi, o rambután (Figura 1). Desde ahí ya se te está antojando, ¡lo se! Esta pulpa es rica en azúcares y es bastante ácida, características que brindan el ambiente ideal para que los microorganismos crezcan y suce-

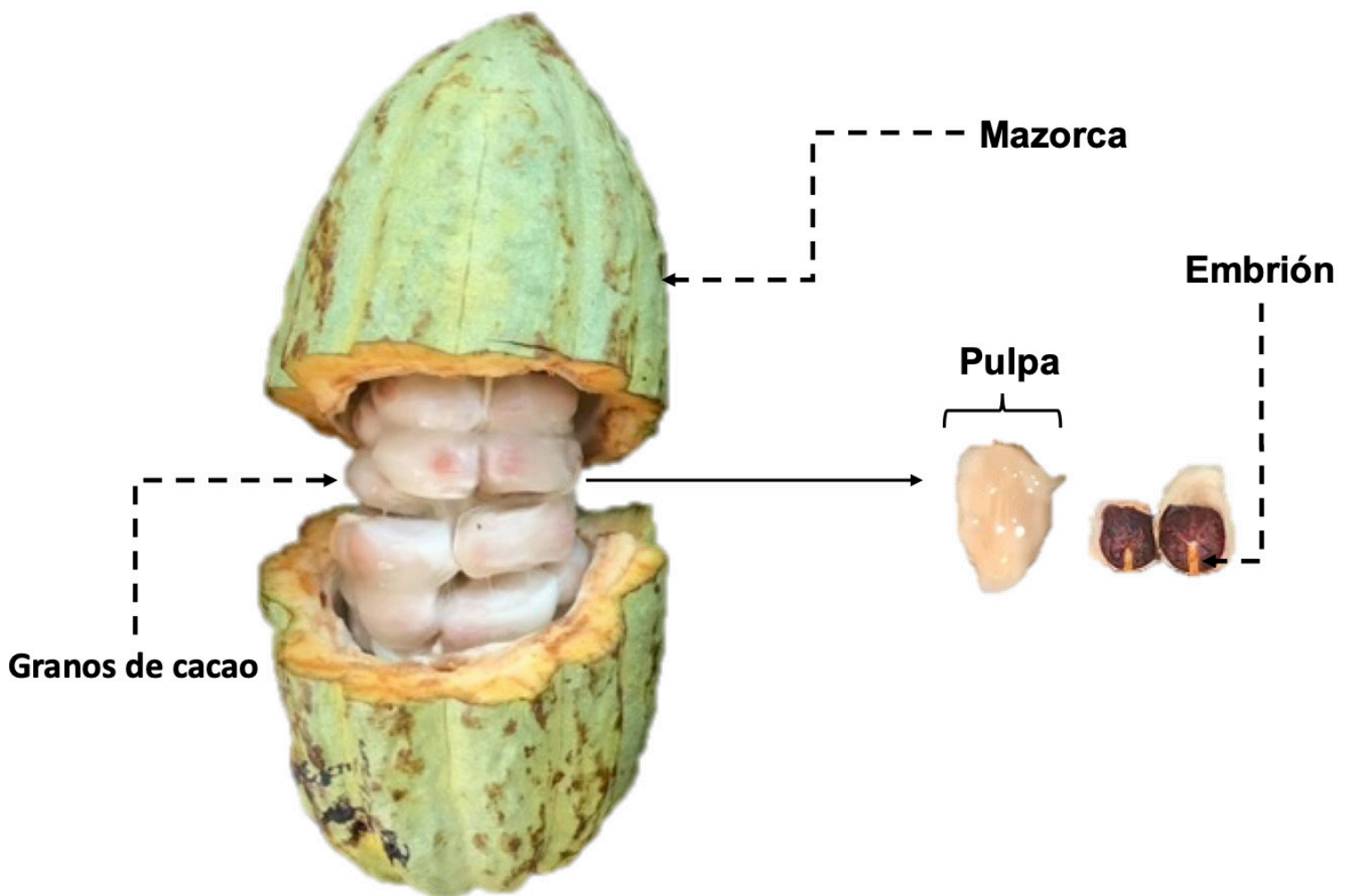


Figura 1. Partes del fruto de *Theobroma cacao* L.

da la fermentación, proceso responsable de la transformación de diferentes compuestos que servirán de precursores de aroma y sabor [1].

La fermentación es un conjunto de reacciones bioquímicas producidas por microorganismos como levaduras y bacterias ácido-lácticas (BAL) y ácido-acéticas (BAA) [2]. Este proceso sucede naturalmente desde el momento en el cual se quiebra la mazorca que protege a los granos de cacao, los microorganismos llegan de todas partes a fermentar los granos, ya sea del ambiente, de las manos de los trabajadores o de los cajones de madera donde se realiza la fermentación. Las levaduras son los microorganismos encargados de comenzar la fermentación consumiendo los azúcares disponibles en la pulpa y transformándolos a alcoholes, ácidos y ésteres [2]. Por consecuencia, el ambiente en el cual se encuentran los granos de cacao va cambiando, esto favorece el crecimiento de otros microorganismos como las bacterias áci-

do-lácticas que toman azúcares y alcoholes para transformarlos en ácido láctico. Por último, llegan las bacterias ácido-acéticas que toman alcoholes como sustrato y los convierten a ácido acético, esta última al ser una reacción exotérmica, hacen que aumente la temperatura hasta 50 °C en los granos de cacao [2].

En México, la fermentación de cacao es un proceso artesanal donde las técnicas de fermentación pueden provenir del conocimiento de generaciones antepasadas, considerando que éstas varían dependiendo de la región, por las costumbres que tengan y que hoy en día se siguen practicando [1]. Por ejemplo, en algunas comunidades fermentan amontonando el cacao y colocándoles hojas de plátano encima, otras lo realizan en cajones de madera, otras técnicas antes de empezar la fermentación drenan el exceso de pulpa y después los colocan en los cajones de madera. Por lo tanto, existen diversas variantes de técnicas de fermentacio-

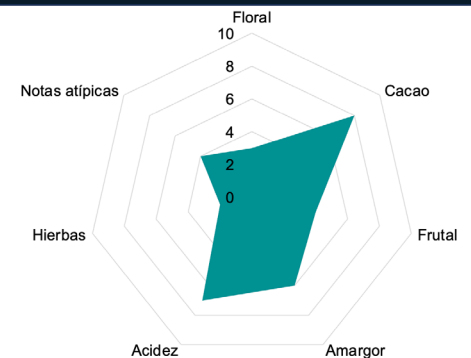
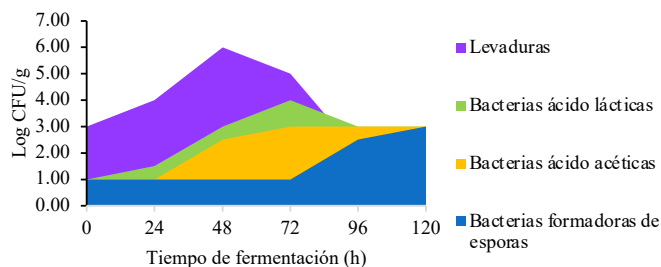
nes en el mundo y que son interesantes de estudiar por las modificaciones tanto sensoriales, químicas como microbiológicas, que pueden ocasionarle al proceso fermentativo del cacao. Por esta razón, las fermentaciones tradicionales de cacao suelen ser bastante heterogéneas en cuanto al perfil sensorial del grano de cacao obtenido y la calidad del grano fermentado en general. Existen factores como el origen del grano, la temporada del año, si se fermenta en cajón de madera, en sacos de yute o en montones, la técnica de volteo de los granos e inclusive si se cambia el sitio de fermentación puede afectar el sabor y olor del grano [3].

¿Te imaginas la problemática de un productor de cacao, el cual cada vez que quiere vender su cacao a chocolateros, no pueda ofrecerles granos de cacao con sabores característicos? Para que tengas más contexto de la

situación, imagina que, al comprar tu barra de chocolate favorita, por su sabor y olor, no te vuelva a saber igual y que en cada nuevo intento pruebes algo totalmente diferente. Fermentar suena bastante complejo, ¿verdad?, pero no te agobies que la biotecnología se encuentra trabajando en ello para seguir fomentando estos procesos tradicionales e importantes para cada comunidad (Figura 2).

Actualmente se conoce que la diversidad microbiana influye mucho en el perfil sensorial de los granos de cacao fermentados, por lo tanto, se ha intentado generar inóculos que dirijan los sabores y aromas hacia perfiles más controlados y homogéneos. Ahora imagina que eres un chef y tienes un restaurante que dirigir, en el cual se prepara comida muy rica, pero la condición del dueño es que exista un menú fijo, donde los platillos sean los mismos, para que

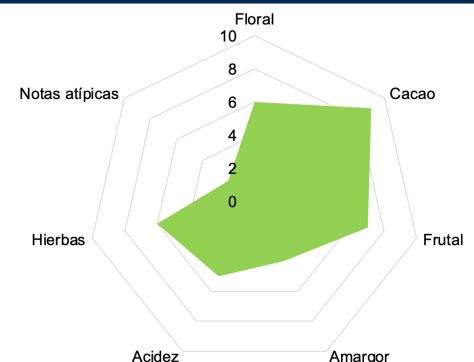
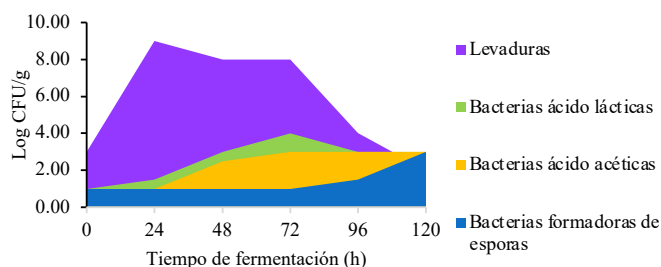
Fermentación espontánea



Dinámica microbiana

Perfil sensorial

Fermentación con inóculo



Dinámica microbiana

Perfil sensorial

Figura 2. Diagrama descriptivo de la dinámica de microorganismos y el perfil sensorial en una fermentación espontánea comparado con una fermentación que se le añade un inóculo

los clientes reconozcan ese lugar por su sazón o platillos estrella. Cuando empiezas a cocinar te das cuenta de que es muy difícil mantener el sabor constante en los platillos, por lo tanto, contratas personas especialistas en cada platillo, alguien experto en hacer pozole rojo, otro para los postres como los pasteles con sabores cítricos y otro para las bebidas calientes con olor a café. En este caso, el inóculo en la fermentación de cacao son las personas expertas en hacer cada platillo. El inóculo es una carga adicional de microorganismos, de la cual previamente se conoce que compuestos pueden producir y por lo tanto que aromas y sabores característicos son capaces de generar. Teniendo como consecuencia perfiles sensoriales específicos con mayor repetibilidad [4]. En la Figura 2, se muestra el ejemplo de dinámica microbiana que podría existir en una fermentación espontánea, sin añadir inóculo, en donde predominan las levaduras las primeras horas de la fermentación, seguido de las BAL y las BAA predominan al final del proceso, siendo muy aleatorio el perfil sensorial que se pudiera obtener.

En contraste, a cuando se le añade un inóculo con mayor carga microbiana de una levadura con potencial de síntesis de compuestos aromáticos deseables. Por lo tanto, la dinámica microbiana tiende a aumentar con respecto al microorganismo que se añadió, además de ocasionar inhibiciones entre otros microorganismos o competencia de sustrato ocasionando perfiles sensoriales diferentes y definidos en comparación a una fermentación espontánea [3,4].


Entonces ahora pensarás que es muy fácil la decisión, añades inóculos a todas las fermentaciones del mundo y tendremos granos de cacao fermentados de manera ideal, pues desafortunadamente no es tan sencillo. Como en todo lugar cuando llega alguien extraño a una comunidad, pueden suceder diferentes situaciones como competencia por sustrato (el alimento) del inóculo contra los microorganismos endémicos de las fermentaciones, que el inóculo desplaza la diversidad microbiana que

ya existía y ahora domine el proceso fermentativo, que los granos de cacao se fermenten parcialmente, que no alcance el incremento de temperatura idóneo ($>50\text{ }^{\circ}\text{C}$), o peor aún que el perfil de sabor y olor de la fermentación inoculada sepa a queso podrido y suceda todo lo contrario a lo que esperábamos [1,2]. Por lo tanto, aun se continúan los esfuerzos por encontrar el inóculo ideal, y en ocasiones el inóculo ideal debe ser especialmente diseñado para la fermentación donde se plantea introducirlo. Por esa razón, es necesario primero estudiar la diversidad microbiana presente en fermentaciones espontáneas para saber que microorganismo puede caerles bien y además identificar qué puntos de mejora necesita ese grano de cacao específicamente [2].

Algunos ejemplos de inóculos que se han estudiado son las levaduras, las cuales se ha identificado que producen ésteres que se asocian a notas florales, frutales e inclusive que aumentan la actividad antioxidante de los granos de cacao.

La especie de *Saccharomyces cerevisiae* es de las más utilizadas al favorecer la producción de alcohol y en algunas ocasiones ha acortado los tiempos de fermentación. Pero también se ha identificado que no es muy del agrado de los microorganismos endémicos de las fermentaciones donde se ha estudiado y ha reducido la diversidad microbiana [4,6]. Especies del género *Hanseniaspora* como *H. opuntiae*, *H. uvarum* y *H. thailandica* son algunas de las que se han empleado para el mejoramiento del perfil sensorial del grano fermentado produciendo notas a café, miel y flores [4,6]. *Kluyveromyces marxianus* es otra levadura utilizada, para la cual se ha demostrado que puede tanto acelerar la fermentación de cacao y generar compuestos volátiles deseables como ésteres y aldehídos produciendo notas como florales y herbales [5]. El género de *Pichia* también ha sido utilizada en fermentaciones de cacao, buscando que los compuestos aromáticos que genere estén orientados en la formación de un perfil de cacao fino de aroma como notas a frutas frescas y florales [5]. La principal apuesta

está en encontrar las levaduras ideales para usar como inóculo, aunque también se ha explorado el uso de bacterias ácido-lácticas y acéticas. Como ejemplo de bacterias utilizadas están *Acetobacter pasteurianus*, *Lactiplantibacillus plantarum* y *Limosilactobacillus fermentum* [6].

Estos avances en la biotecnología de fermentación de cacao serán sin duda, de gran apoyo tanto para los pequeños productores como grandes, debido a que buscan ser competitivos en el mercado chocolatero, además de garantizar perfiles organolépticos bien definidos para sus granos. Para tu próxima aventura chocolatera, trata de buscar barras de chocolate que en su etiqueta especifiquen de donde proviene los granos de cacao, el tiempo de fermentación, e inclusive, en algunos productos, se incluyen las condiciones de tostado. Y por supuesto, ahora tus miradas dirígelas hacia barras de chocolate con alto contenido de cacao para que logres identificar sabores como café, miel, flores, frutas, y vuélvete detective de microorganismos al tratar de identificar quien produjo eso en la fermentación. 

Referencias

- [1] Utrilla-Vázquez, M., Rodríguez-Campos, J., Avendaño-Arazate, C. H., Gschaedler, A., & Lugo-Cervantes, E. (2020). Analysis of volatile compounds of five varieties of Maya cocoa during fermentation and drying processes by Venn diagram and PCA. *Food Research International*, 129(July 2019), 108834. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108834>
- [2] de Vuyst, L., & Leroy, F. (2020). Functional role of yeasts, lactic acid bacteria and acetic acid bacteria in cocoa fermentation processes. *FEMS Microbiology Reviews*, 44(4), 432–453. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa014>
- [3] Velásquez-Reyes, D., Gschaedler, A., Kirchmayr, M., Avendaño-Arazate, C. H., Rodríguez-Campos, J., Calva-Estrada, S. de J., & Lugo-Cervantes, E. (2021). Cocoa bean turning as a method for redirecting the aroma compound profile in artisanal cocoa fermentation. *Heliyon*, 7(8), e07694. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07694>

[heliyon.2021.e07694](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07694)

- [4] Díaz-Muñoz, C., van de Voorde, D., Tuenter, E., Lemarcq, V., van de Walle, D., Soares Maio, J. P., Mencia, A., Hernandez, C. E., Comasio, A., Sioriki, E., Weckx, S., Pieters, L., Dewettinck, K., & de Vuyst, L. (2023). An in-depth multiphasic analysis of the chocolate production chain, from bean to bar, demonstrates the superiority of *Saccharomyces cerevisiae* over *Hanseniaspora opuntiae* as functional starter culture during cocoa fermentation. *Food Microbiology*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104115>
- [5] Crafacek, M., Mikkelsen, M. B., Saerens, S., Knudsen, M., Blennow, A., Lowor, S., Takrama, J., Swiegers, J. H., Petersen, G. B., Heimdal, H., & Nielsen, D. S. (2013). Influencing cocoa flavour using *Pichia kluyveri* and *Kluyveromyces marxianus* in a defined mixed starter culture for cocoa fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 167(1), 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.024>
- [6] Papalexandratou, Z., Lefeber, T., Bahrim, B., Lee, O. S., Daniel, H. M., & de Vuyst, L. (2013). *Hanseniaspora opuntiae*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus fermentum*, and *Acetobacter pasteurianus* predominate during well-performed Malaysian cocoa bean box fermentations, underlining the importance of these microbial species for a successful cocoa. *Food Microbiology*, 35(2), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.02.015>

Publica con nosotros

¿Qué artículos se reciben?

Se aceptarán trabajos escritos en español o inglés cuyo tema central sean la biotecnología o los bioprocesos. Se publican únicamente artículos originales y de revisión, siempre y cuando su objetivo sea la divulgación. Los trabajos deberán estar escritos con lenguaje sencillo, siendo el público objetivo estudiantes de bachillerato, licenciatura y posgrado.

¿Quién puede escribir?

Se reciben colaboraciones de técnicos, investigadores, administrativos, alumnos, representantes de empresas de base científica, divulgadores y periodistas científicos de cualquier institución nacional o internacional.

¿Qué debe contener tu manuscrito?

1. **Título del artículo** (Máximo 6 palabras).
2. **Subtítulo** (Opcional, máximo 8 palabras).
3. **Autor(es)**: Nombres y apellidos de cada autor acompañados de su afiliación institucional, en caso de existir. Máximo se aceptan 3 autores para secciones largas, y dos para secciones cortas. Incluir el correo electrónico del autor de correspondencia.
4. **Resumen**: Máximo 100 palabras.
5. **Palabras clave** (3 palabras clave que describan el contenido del manuscrito).
6. **Texto**: Mínimo 9,000 y máximo 10,000 caracteres totales para secciones largas. Mínimo 4,500 y máximo 5,000 caracteres totales para secciones cortas. El conteo de caracteres totales incluye espacios. La extensión del texto no incluye las referencias, los títulos, los datos de los autores, las palabras clave, el resumen ni los pies de figura.
7. **Por lo menos 1 imagen citada en el texto y entre 2 y 3 imágenes adicionales**, sin derechos de autor o referenciadas, que apoyen al entendimiento de su manuscrito. Todas las anteriores deben estar en formato PNG, JPG o JPEG, mínimo de 300 ppi y requieren estar acompañadas de su correspondiente pie de figura.
8. **Referencias**: En formato APA, incluyendo identificador DOI, citas dentro del texto entre corchetes y en negritas. Mínimo 2 y máximo 6 referencias.

¿Cómo envío mi manuscrito?

Revisa información complementaria y envía tu manuscrito a través de nuestra plataforma:

<http://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/about/>



