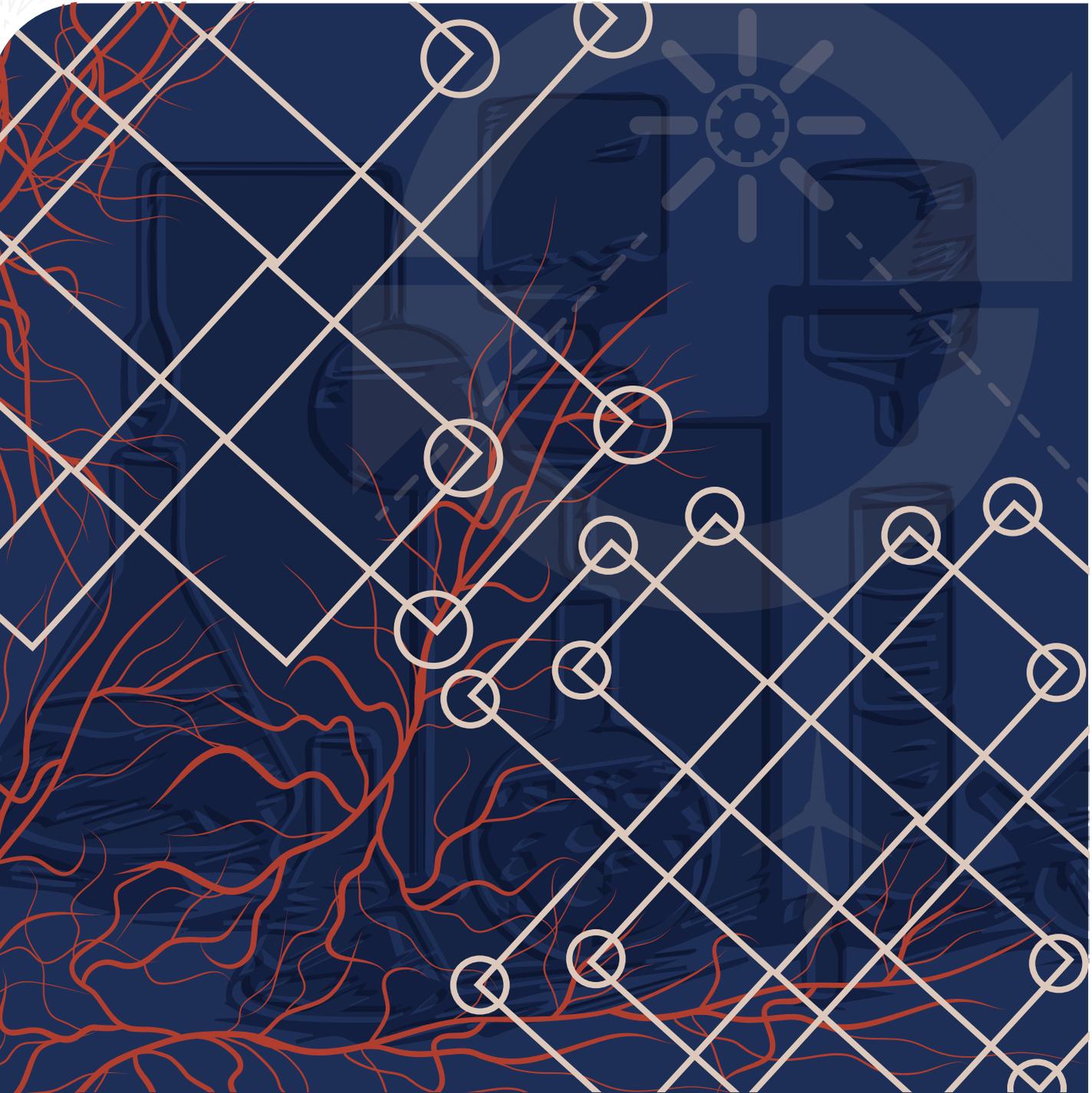




PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

14



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

ENERO-JUNIO 2025

VOLUMEN 8, NÚMERO 14

DIRECTORIO

Dra. Silvia Amaya Llano

RECTORA

Dra. Oliva Solís Hernández

SECRETARIA ACADÉMICA

Dr. Manuel Toledano Ayala

SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y POSGRADO

Lic. Diana Rodríguez Sánchez

DIRECTORA DEL FONDO EDITORIAL UNIVERSITARIO

Lic. Ivonne Álvarez Aguillón

COORDINADORA DE PUBLICACIONES PERIÓDICAS

Dra. María de la Luz Pérez Rea

DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

JEFE DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Lic. Cristian Emanuel Tovar Navarro

COORDINADOR DEL DESPACHO DE PUBLICACIONES
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología, Vol. 8, Núm. 14, enero-junio 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro., Tel. (442) 1921200 ext. 6023, <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas>, perspectivasci@uaq.mx. Editores responsables: Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez, Christopher Alexis Cedillo Jiménez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2021-81011485000-102, ISSN: 2683-3107, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Christopher Alexis Cedillo Jiménez, Cerro de las Campanas, s/n Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro. Fecha de última modificación: 31 de enero de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido, siempre y cuando se atribuya la fuente y se proporcione un enlace al original. Esta obra está bajo Licencia Creative Commons: Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



Esta revista está actualmente registrada en el Directorio de Latindex.





PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DIRECTOR

Dr. Christopher Alexis Cedillo Jiménez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Dra. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez

Investigadora independiente, Estados Unidos

Dr. Jesús Alejandro Franco Piña

Universidad Nacional Autónoma de México, México

EDITORES RESPONSABLES

COMITÉ ASESOR CIENTÍFICO

Dr. Manuel Toledano Ayala

Universidad Nacional Autónoma de México, México

ÁREA: SISTEMAS EMBEBIDOS

Dra. Marcela Vargas Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México, México

ÁREA: BIOSISTEMAS Y BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

Dra. Mónica Ledesma Motolinía

Universidad Autónoma de Puebla, México

ÁREA: FÍSICA E INGENIERÍA DE MATERIALES

Dra. Angélica Godínez Oviedo

Universidad Autónoma de Querétaro, México

ÁREA: MICROBIOLOGÍA E INOCUIDAD ALIMENTARIA

Dr. Saúl Tovar Arriaga

Universidad Autónoma de Querétaro, México

ÁREA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL

EQUIPO EDITORIAL

Lic. Karla Guillén Mancilla

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DISEÑO EDITORIAL Y PORTADA

Jesús Abraham Salinas Sánchez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

AUXILIAR EDITORIAL

Andrea Cristina Garza Sandoval

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ing. Soid Ruiz Ramírez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

CORRECCIÓN DE ESTILO



CONTENIDO

ARTÍCULOS

PERSPECTIVAS ACTUALES EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO: PUN ENFOQUE EN LA FOTOCATÁLISIS Y SUS AVANCES6

Carlos Daniel Constantino Robles
Rufino Nava Mendoza
María de los Ángeles Cuán Hernández

PEROVSKITAS Y EL FACTOR DE TOLERANCIA: LA CIENCIA DETRÁS DE LA INNOVACIÓN22

Martín Adrián Cortés Cuán
Rufino Nava Mendoza
Carlos Martín Cortés Romero
María de los Ángeles Cuán Hernández

PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SUSTENTABLE DE AVIACIÓN A PARTIR DE BIOMASAS RESIDUALES Y ACEITE DE INSECTOS: UNA REVISIÓN.....31

Juan Jesús Reséndiz Luna
Claudia Gutiérrez Antonio
Valeria Caltzontzin Rabell

EVALUACIÓN MECÁNICA Y MORFOLÓGICA DE FIBRAS CAPILARES POLIMÉRICAS OBTENIDAS DE DIALIZADORES COMERCIALES47

Edgar Daniel Guzmán Sagaz
Julio Alejandro Rodríguez González
Eduardo José Trujillo
Omero Nicolás Olalde Mendoza
Jorge Alberto Soto Cajiga

TERAPIA FOTODINÁMICA Y APLICACIONES EN BIOMEDICINA60

Ricardo Lozano Rosas
David Loaiza Toscuento
Elvis A. García Cortés
Doralycia Carranza Zuñiga
M. Gloria Conde Cuatzo
Teresita Spezzia Mazzocco



PERSPECTIVAS ACTUALES EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO: UN ENFOQUE EN LA FOTOCATÁLISIS Y SUS AVANCES

Current perspectives on hydrogen production: a focus on photocatalysis
and its advances

Carlos Daniel Constantino Robles*

Rufino Nava Mendoza

María de los Ángeles Cuán Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México

*carlos30.constantino@gmail.com

01



Resumen

El hidrógeno es considerada una solución viable en la transición hacia fuentes de energía limpias y sostenibles. Su potencial como un combustible versátil y ecológico lo convierte en un recurso prometedor para disminuir la dependencia de combustibles fósiles. Actualmente existen varios procesos para obtener hidrógeno; sin embargo, algunos generan emisiones de gases contaminantes. Un método alternativo involucra el uso de materiales semiconductores fotocatalíticos, los cuales funcionan absorbiendo la luz solar, desencadenando una serie de reacciones químicas

para descomponer el agua y liberar hidrógeno. Aunque los semiconductores fotocatalíticos aún enfrentan desafíos para su aplicación, tienen un gran potencial y hay avances continuos en investigación y desarrollo para mejorar su eficiencia y la estabilidad. En la presente se incluye un panorama general de los métodos para obtener hidrógeno, enfatizando en el uso de semiconductores fotocatalíticos. También se proporciona una breve descripción de algunas investigaciones sobre materiales fotocatalíticos para la producción de hidrógeno.

Palabras clave: descarbonización, eficiencia fotocatalítica, fotocatalisis, hidrógeno, par electrón-hueco, perovskitas, semiconductores.

Abstract

Hydrogen is considered as a viable solution in the transition to clean and sustainable energy sources. Its potential as a versatile and non-polluting fuel renders it a promising resource for reducing dependence on fossil fuels. There are currently several methods for obtaining hydrogen; however, some of them generate polluting gas emissions. An alternative method involves the use of photocatalytic semiconductor materials, which work by absorbing sunlight, triggering a series of chemical reactions to

decompose water and release hydrogen. Although photocatalytic semiconductors still face challenges for application, they have great potential and there are ongoing advances in research and development to improve their efficiency and stability. The present research includes an overview of methods to obtain hydrogen, with emphasis on photocatalytic semiconductors. A brief description of some research on photocatalytic materials for hydrogen production is also provided.

Keywords: decarbonization, photocatalytic efficiency, photocatalysis, hydrogen, electron-hole pair, perovskites, semiconductors.



Introducción

El hidrógeno representa una fuente de energía prometedora en la búsqueda de soluciones para la transición hacia un futuro más sostenible y limpio. Su versatilidad y bajo impacto ambiental lo convierten en una opción atractiva para diversas aplicaciones energéticas [1]. Existen varias fuentes de hidrógeno, incluyendo los combustibles fósiles y la biomasa. Asimismo, se pueden encontrar numerosas opciones en las tecnologías de producción, como procesos químicos, biológicos, electrolíticos, fotocatalíticos y termoquímicos [2].

La producción de hidrógeno se realiza convencionalmente por métodos como el reformado de vapor y la electrólisis; sin embargo, presentan desafíos relacionados con la liberación de gases de invernadero y el consumo de energía [3]. En este contexto, la fotocatalisis es una alternativa atractiva y sostenible [4] que implica el uso de materiales semiconductores para propiciar reacciones químicas mediante la absorción de luz solar. Empero, aún existen obstáculos en términos de estabilidad y eficiencia en los materiales, así como de optimización de procesos a gran escala [5].

La fotocatalisis aprovecha la energía solar para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. Al exponerse al sol, los semiconductores fotosensibles generan pares electrón-hueco que forman una serie de reacciones químicas y originan la división de la molécula del agua en sus componentes básicos [6], [7]. Este proceso ofrece ventajas significativas, incluyendo la implementación de una fuente de energía limpia y renovable, así como la producción de hidrógeno puro sin emisiones de efecto invernadero [7].

Se han explorado diversas estrategias, como el dopaje con metales de transición, para incrementar el rendimiento fotocatalítico. Los semiconductores de perovskita, por ejemplo, han captado atención en la investigación de procesos fotocatalíticos debido a sus notables propiedades ópticas y electrónicas [5], [6]. Entre ellos, el titanato de estroncio (SrTiO_3) representa un candidato prometedor para aplicaciones como la división del agua y la fotodegradación de contaminantes orgánicos. En este contexto, Su y colaboradores [9], [8] sintetizaron SrTiO_3 dopado con aluminio, y constataron una reducción en la banda prohibida y una duplicación de la actividad fotocatalítica en la división del agua. Asimismo, Kafeshane *et al.* [10], [8] desarrollaron muestras de SrTiO_3 co-dopadas con níquel y cadmio al 5 %, logrando un rendimiento notable en la foto-degradación de rodamina B y naranja de metilo. En adición, algunas investigaciones teóricas han demostrado que el dopaje puede potenciar aún más la efectividad fotocatalítica del compuesto. Bentour *et al.* [11], [8], por ejemplo, mostraron mediante alineación de bandas que el dopaje de átomos de



oxígeno con selenio y telurio mejora significativamente las propiedades relacionadas con la división del agua. Por su parte, Liu *et al.* [12], [8] evaluaron el efecto del dopaje de silicio en distintos sitios del SrTiO_3 , lo que resultó en mejoras ópticas derivadas de la introducción de estados de impureza dentro de la banda prohibida.

En los apartados siguientes, se mencionan diversas formas de producir hidrógeno. Se inicia desde los procesos convencionales y sus clasificaciones, destacando el papel emergente de la fotocatalisis (materiales-perovskitas) como una tecnología prometedora para la producción de hidrógeno.

Hidrógeno

Este elemento es el elemento químico más liviano, con un número atómico de 1 y una masa atómica de 1.0079 u; su capa externa posee un solo protón como núcleo y un electrón en su estado más estable. En forma libre se presenta como molécula diatómica (H_2) altamente combustible [13].

El hidrógeno constituye alrededor del 75 % de la masa del universo, pero aunque abunda en las estrellas y en planetas gigantes gaseosos, raramente se encuentra en su forma aislada, pues tiende a formar enlaces covalentes con otros elementos. Un ejemplo notable es su combinación con oxígeno para formar agua, o con carbono, dando lugar a una amplia variedad de compuestos orgánicos [13]. Además, es reconocido como un combustible limpio y sostenible, con aplicaciones en celdas de combustible, motores, producción química, etcétera. Su alta densidad energética (120.7 MJ/kg) lo convierte en una opción atractiva para las industrias. Sin embargo, producirlo genera dióxido de carbono, que es perjudicial para el medio ambiente [14]. De acuerdo con el tipo de materia prima utilizada y el método, las emisiones de CO_2 asociadas a su vía de producción varían en magnitud; el hidrógeno se clasifica en diferentes categorías según su técnica de extracción [15].

- Hidrógeno verde: Se obtiene del agua a través de la electrólisis [15].
- Hidrógeno azul: Se extrae del gas natural, metano o licuados del petróleo aplicando procesos de reformado [15].
- Hidrógeno gris: Se produce de la misma forma que el hidrógeno azul, a diferencia de que no se usan tácticas para limitar las emisiones de CO_2 [15].
- Hidrógeno negro: Se consigue a partir de carbón, energía nuclear y electricidad de la red (representa el 23 % de la producción mundial) [15].

La ventaja que posiciona al H_2 como una opción combustible prometedora es su elevada densidad energética (120 MJ/kg), casi tres veces superior a la del gas licuado de petróleo (46 MJ/kg) y el diésel (44 MJ/kg) [16]. Además, dicho elemento

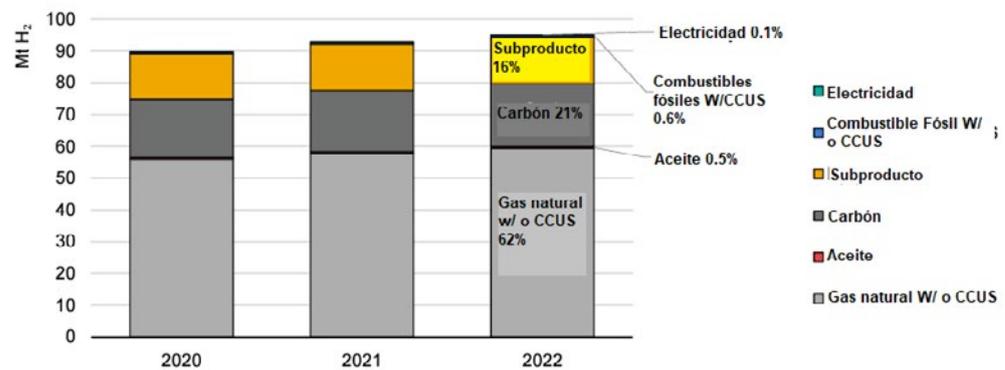


es considerado el portador energético del futuro por tres razones clave: la eficiencia energética, la dependencia energética y el impacto medioambiental. Actualmente, el mercado estriba en los combustibles fósiles, que sufren de dos grandes inconvenientes, pues son recursos no renovables y de distribución geográfica limitada, lo que provoca el aumento de su precio. En ese sentido, con la innovación de tecnologías de extracción de hidrógeno de fuentes renovables se lograría reducir las emisiones de CO_2 de los combustibles fósiles, debido a que el hidrógeno emite vapor de agua no contaminante [17].

Procesos de producción

Dado que el hidrógeno no se encuentra en estado puro en la naturaleza, es necesario obtenerlo mediante la transformación de otras materias primas. La producción mundial alcanzó en 2022 aproximadamente 95 Mt, 3 % superior en comparación con 2021 [18]. En la Figura 1 se presentan las fuentes de hidrógeno explotadas en 2022, y se observa que más de la mitad se extrajo a partir de gas natural. Además, el 70 % del volumen a nivel mundial provino de China, Estados Unidos, Medio Oriente, India y Rusia (en orden descendente) [18].

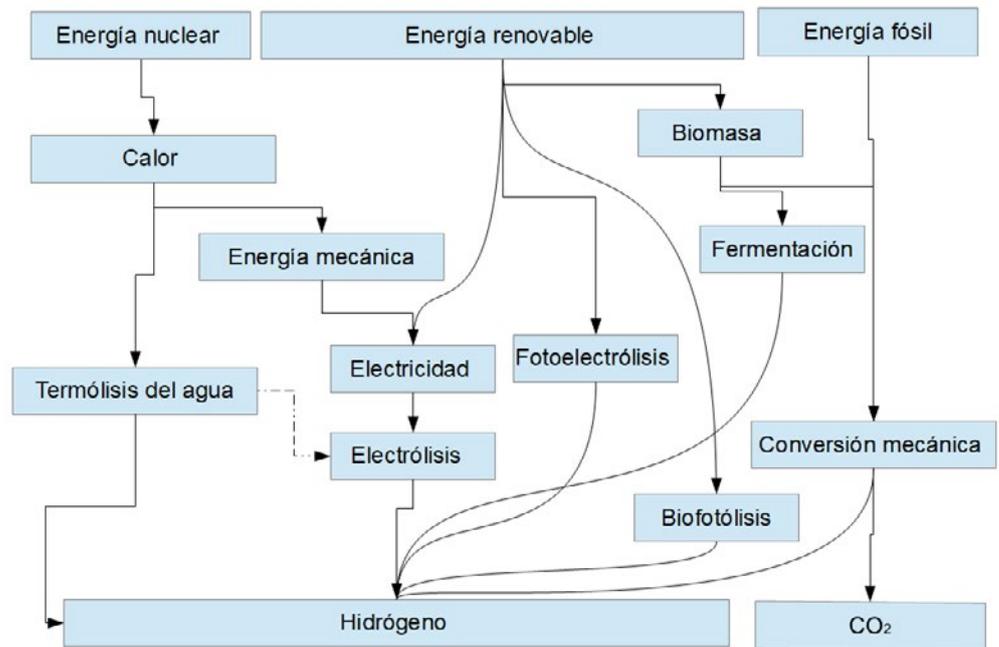
FIGURA 1.
Generación de hidrógeno en 2022 [18].



Afortunadamente, existen múltiples métodos de producción, un ejemplo es la electrólisis, que se lleva a cabo a partir de energía nuclear, eólica o solar. Algo similar ocurre con los procesos de termólisis activados con energía nuclear. La gasificación, por otra parte, se puede aplicar al carbón y la biomasa. Cada método difiere en su impacto ambiental y eficiencia energética; en la Figura 2 se ilustran los sistemas disponibles para recolectar hidrógeno de diversas fuentes [19]. La presente revisión se complementa con representaciones que trazan esquemáticamente los procesos y tecnologías involucrados en dicha labor.



FIGURA 2.
Métodos de producción de hidrógeno. Adaptado de [19].



Procesos de reformado (conversión química)

Se trata de las técnicas más prolíferas para la obtención de hidrógeno. Los procesos de reformado se pueden categorizar en endotérmicos y exotérmicos. Los primeros necesitan calor proveniente de una fuente externa; los segundos lo liberan al producirse la reacción química [19].

- El proceso de reformado de vapor con agua es adaptable a una gama de hidrocarburos y alcoholes. Consiste en mezclar vapor de agua con metano, el componente principal del gas natural, y llevar la mezcla a temperaturas entre 700 y 1000 °C en presencia de un catalizador generalmente a base de níquel. En la reformación primaria se obtiene hidrógeno y monóxido de carbono, pero puede haber una etapa adicional donde el CO y el vapor de agua reaccionan para producir más H₂ y CO₂, conocida como reformación secundaria [19].
- En la oxidación parcial de hidrocarburos, solo el carbono se oxida, dejando el hidrógeno libre; constituye un método químico dedicado a generar *syngas*, compuesto por CO, CO₂, H₂ y CH₄ en diferentes proporciones según la composición de la materia prima y el agente gasificante utilizado (oxígeno, aire, vapor de agua, etc.) [19]. Dicha mezcla es precursora de numerosos procesos industriales, incluyendo la síntesis de metanol e hidrocarburos líquidos a través de la catálisis de Fischer-Tropsch [19].



Procesos de pirólisis

La pirólisis implica la desintegración de un material mediante el calor dentro de un ambiente anaeróbico, con temperaturas de ~450 °C para la biomasa y ~1200 °C para el carbón. Para aislar el hidrógeno interesa controlar la reacción de modo que se libere primero un *syngas*, para después ajustarlo mediante desplazamientos y procesos de purificación [19]. La pirólisis se enfoca en mejorar la eficiencia del proceso, refinar la calidad de los productos y desarrollar catalizadores que dirijan las reacciones hacia productos específicos. También se investiga cómo integrarla con otras tecnologías de conversión de biomasa, como la gasificación y la digestión anaeróbica, para eficientar el consumo de recursos y la producción de energía.

Proceso de gasificación

Consiste en una técnica termoquímica de generación de *syngas* a partir de materiales carbonosos, como la biomasa y algunos residuos industriales o urbanos. Presenta una reducción significativa de emisiones en comparación con la incineración directa de combustibles fósiles. Sin embargo, la inversión inicial es elevada, al igual que los costos operativos, pues es necesario un pretratamiento de los materiales y un manejo de subproductos, alquitranes y cenizas, que pueden ser problemáticos.

Termólisis

La termólisis es un método versátil y eficaz para separar sustancias en sus componentes básicos a través del calor. Su aplicación abre oportunidades para la gestión de residuos y la producción sostenible de materiales y fuentes energéticas. Sin embargo, requiere altas temperaturas y, por lo tanto, un consumo elevado de energía. Asimismo, el manejo de los gases y residuos resultantes puede ser complicado, especialmente si contienen compuestos tóxicos o corrosivos. La termólisis implica la obtención del hidrógeno de hidrocarburos o agua aplicando calor. Bajo esta definición, el reformado, la gasificación y la pirólisis también conforman procesos de termólisis. Se clasifican en dos tipos [19]:



Clase I: ciclos termoquímicos de temperaturas no extremas

- Familia del azufre: Ciclo termoquímico desarrollado en los años 70 que requiere esencialmente dos niveles térmicos, uno a 850 °C para dividir el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y otro de 360 °C aproximadamente para descomponer el yoduro de hidrógeno (HI) [19].
- Ciclo UT-3: Requiere múltiples niveles térmicos, con un máximo de 750 °C. Asimismo, para la extracción del hidrógeno se utilizan membranas que operan bajo presiones atmosféricas [19].

Clase II: conversión química

- Procesos de descarbonización: Se separa el carbono de un hidrocarburo por medio de una mezcla con vapor de agua; emite CO_x [19].
- Reducción de óxidos metálicos: El aislamiento de H_2 mediante la reducción de óxidos metálicos es un proceso que involucra la reacción de un óxido metálico con un agente reductor [19].
- Electrólisis: Consiste en la ruptura de la molécula del agua al aplicarle una corriente eléctrica.
- Fermentación: a partir de biomasa, puede ser alcohólica o anaeróbica [19].

Procesos fotolíticos

También conocida como fotodescomposición, la fotólisis se refiere a la separación química de compuestos por medio de la absorción lumínica. Este tipo de reacciones es fundamental en la química ambiental, la fotoquímica y la tecnología de tratamiento de agua y aire [19].

- Fotobiológicos: Ocurren en organismos vivos y son esenciales para la vida en la Tierra, desde la fotosíntesis en plantas hasta el sentido de la vista en los animales. Involucran principalmente microalgas y bacterias fotosintéticas, que liberan hidrógeno a partir de la luz solar gracias a la enzima hidrogenasa. Las algas verdes, especialmente la *Chlamydomonas reinhardtii*, han sido ampliamente estudiadas por dicha capacidad y se ha observado que, ante el estrés causado por la ausencia de azufre, las algas pueden pasar de segregar oxígeno a hidrógeno. A su vez, las bacterias púrpuras no sulfurosas pueden liberar hidrógeno a través de un proceso similar a la fotosíntesis.
- Foelectroquímicos y fotocatalisis: Los procesos foelectroquímicos llevan a cabo la electrólisis del agua utilizando la energía solar y electrodos se-

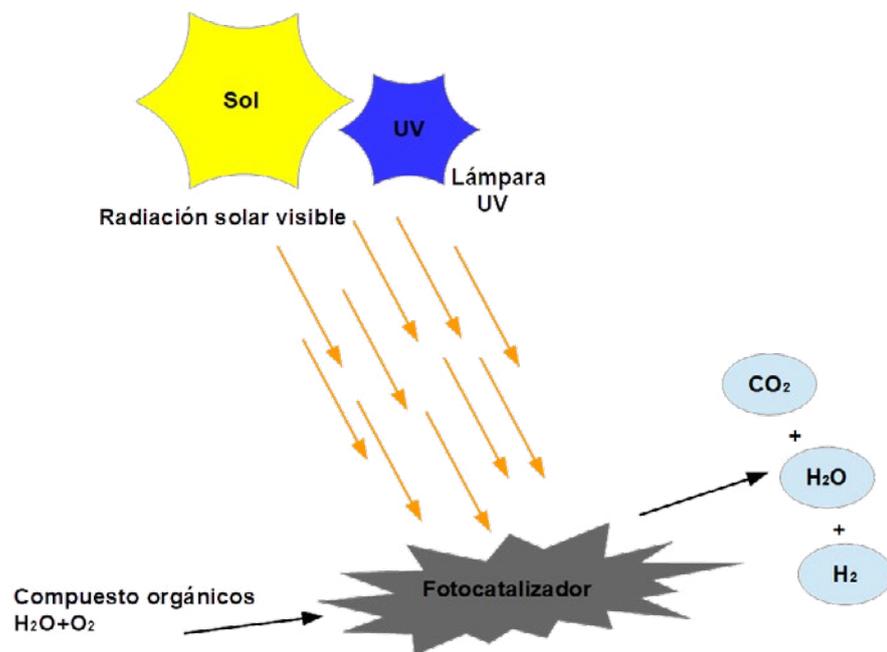


miconductores. La fotocatalisis aprovecha la energía solar a través de materiales semiconductores que operan a diferentes longitudes de onda. Las investigaciones actuales se centran en identificar materiales capaces de disociar el agua y mantener su estabilidad.

Fotocatálisis

Los procesos fotocatalíticos, desarrollados en 1972 por Fujishima y Honda [3], también emplean materiales semiconductores en presencia de energía solar para la obtención de hidrógeno a partir del agua [20] (Figura 3). Los semiconductores cuentan con una banda de valencia (BV), ocupada por electrones, y una banda de conducción (BC), donde existen huecos. Cuando estos materiales absorben luz con energía igual o mayor que su brecha prohibida (*band gap*), se movilizan los electrones desde la BV hasta la BC, creando así los pares electrón-hueco (Figura 4) mismos que son cruciales en las reacciones redox y la generación de corriente eléctrica en un material [21]. Los electrones en la banda de conducción facilitan las reducciones en especies químicas, mientras que los huecos en la banda de valencia oxidan otras especies. El mecanismo difiere de los procesos fotoelectroquímicos en que prescinde de electrodos.

FIGURA 3.
Esquema representativo de la fotocatalisis. Adaptado de [26].

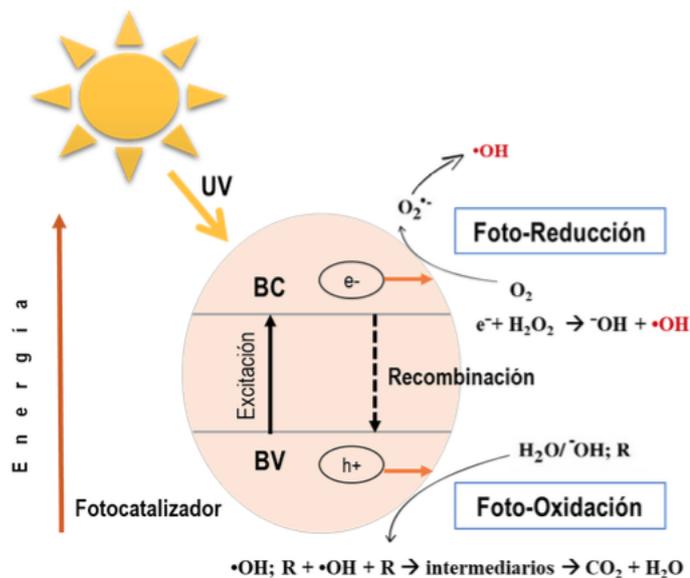




Materiales semiconductores/obtención de hidrógeno

Los semiconductores producen partículas con carga eléctrica, electrones y huecos, cuando el material es expuesto a cierto umbral de energía. Dichas partículas migran a la superficie del fotocatalizador, donde reaccionan energéticamente y logran degradar contaminantes (Figura 4), producir hidrógeno, etc. También puede suceder que se recombinen antes de llegar a la superficie del material, lo que libera calor y disminuye la eficiencia fotocatalítica [22]. Por otro lado, el material no debe generar toxicidad pero mantener una extensa área activa para incrementar dicha eficiencia [21]. Para no degradarse durante el proceso, un semiconductor depende de la energía a la cual se activa y su propia naturaleza química; por ejemplo, hay semiconductores, como dióxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO) y trióxido de tungsteno (WO_3), que solo responden al rango UV, el cual representa una fracción pequeña de la luz solar.

FIGURA 4.
Esquema representativo del proceso de obtención de hidrógeno [26].



Asimismo, la formación de heterouniones ha permitido mejoras en el desempeño fotocatalítico de dichos materiales al prevenir la recombinación del par electrón-hueco. Para lograrlo, los materiales semiconductores pueden ser modificados al introducirles impurezas (nanopartículas metálicas), para que aprovechen mejor los espectros visible e infrarrojo; este proceso denominado *dopaje* extiende la vida media de los pares electrón-hueco [23], [24].

Los materiales tipo perovskita tienen un potencial prometedor en la fotocatálisis debido a sus propiedades únicas: estabilidad química, óptica, estructura cristalina y vida media del par electrón-hueco. Se trata de compuestos con fórmula química ABX_3 (Tabla 1), donde A es un catión de mayor tamaño, B es un catión de menor



tamaño y x_3 es un anión que une A con B. En términos de cristalografía, exhibe una estructura cúbica [25], pero también otras, como la tetragonal, ortorrómbica, romboédrica y hexagonal. La forma del arreglo cristalino depende de la temperatura de calcinación, la presión, la composición química y los defectos estructurales producidos por el dopaje o el método de síntesis [21].

TABLA 1.

Elementos que pueden conformar una perovskita con fórmula química ABX_3 [25].

ABX ₃		
CATIÓN MAYOR A	CATIÓN MENOR B	ANIÓN X ₃
Sr	Ti	O
Ca	Zn	F
Ba	Fe	Cl
Rb	Cu	Br
CS	Ni	I

Las perovskitas pueden doparse con oro, plata, platino, paladio y otros elementos (Tabla 3), creando sistemas cuyas propiedades plasmónicas, catalíticas y conductoras superan las limitaciones de los componentes individuales al interactuar con la luz [27]. En este contexto, las NP se excitan mediante la resonancia superficial del plasmón, un proceso que se activa por las oscilaciones electrónicas en la banda de conducción de los metales nobles al recibir luz visible [27], [28], [29].

TABLA 2.

Fotocatalizadores plasmónicos de metal-semiconductor típicos para una variedad de aplicaciones en fotocatalisis [41].

SEMICONDUCTORES METÁLICOS PLASMÓNICOS	APLICACIONES EN FOTOCATÁLISIS	AÑO DE PUBLICACIÓN
Au-TiO ₂	Oxidación fotocatalítica de etanol y metanol; celdas de combustible fotovoltaicas	2005
Ag/SiO ₂ -TiO ₂	Descomposición de MB	2008
Au@CeO ₂	Oxidación del alcohol bencílico a benzaldehído	2014



SEMICONDUCTORES METÁLICOS PLASMÓNICOS	APLICACIONES EN FOTOCATÁLISIS	AÑO DE PUBLICACIÓN
Au/ZnO	Degradación del tinte MO	2016
Au/Cu ₂ O/Pt	División del agua	2018
Cadena Au@Zn _{0.67} Cd _{0.33} S	Evolución fotocatalítica del hidrógeno	2019
ZnO-CuO dopado con Cu	Fotodescontaminación de efluentes textiles	2020
Mg/MgO	Remediación ambiental SF ₆	2020
Bi/α-MnS/Bi ₂ MOO ₆	Reducción de CO ₂	2021
Ag/BiFeO ₃ fibroso	Conversión de energía fotoelectroquímica	2021
SiO ₂ -Au-Pt	Degradación de MB	2021
Ag/BiVO ₄	Fotodegradación de rodamina B	2022
AUNBP@Cu ₂ O	Tratamiento del cáncer de mama	2023
Bi/TiO ₂	Reducción de CO ₂	2024

La aplicación a gran escala de semiconductores fotocatalíticos enfrenta ciertos retos. Por ejemplo, el dióxido de titanio (TiO₂) goza de estabilidad química, no toxicidad, alta reactividad, inercia química y biológica, fotoestabilidad y gran longitud de difusión electrónica [30], [31], [32]; no obstante, su rápida recombinación limita el rendimiento, ya que alrededor del 90 % de los electrones y huecos fotogenerados se recombinan por vías no radiativas, formando fonones [33], [34]. De igual modo, el disulfuro de molibdeno (MoS₂) presenta movilidad de portadores de carga y propiedades de absorción óptica, pero al igual que otros materiales fotocatalíticos enfrenta el obstáculo de la recombinación acelerada de los pares electrón-hueco [33].

Aunque no se ha desarrollado una estrategia óptima para mitigar la recombinación, se han llevado a cabo investigaciones para lograrlo mediante la modificación de los atributos fotoeléctricos, electrónicos y morfológicos de los semiconductores. Algunos ejemplos se presentan en la Tabla 3, donde se describe brevemente en qué consiste cada trabajo y la cantidad de H₂ que han obtenido al efectuar las pruebas fotocatalíticas.

TABLA 3.

Investigaciones relacionadas con materiales semiconductores fotocatalíticos para la obtención de H₂.

AUTORES	INVESTIGACIÓN	RESULTADOS
Long Wang y otros, 2022 [34]	Rendimiento de producción de hidrógeno de srTiO ₃ codopado con ce/N activo para la división fotocatalítica del agua	La tasa de separación de agua del srTiO ₃ dopado con ce/N es de 4.28 mmol/g/h.
Zhijia Li y otros, 2023 [35]	Síntesis inducida por redox de srTiO ₃ /α-Fe ₂ O ₃ para una producción de hidrógeno muy mejorada	La tasa de producción de hidrógeno y el rendimiento alcanzaron 9.8 mmol/g/h y 235.2 μmol.
Bentour, H y otros, 2022 [36]	Estudio DFT de srTiO ₃ codopado con se/Mn y Te/Mn para la producción fotocatalítica de hidrógeno con luz visible	El codopaje con telurio/manganeso reduce significativamente el <i>band gap</i> , aproximadamente 1.61 eV.
Liuyang Z. y otros, 2021 [33]	Mejora del rendimiento de la producción fotocatalítica de hidrógeno de srTiO ₃ mediante el recubrimiento con un poloxámero hidrófilo	La producción fotocatalítica de hidrógeno de P123@srTiO ₃ alcanza hasta 4.02 mmol/g/h en ausencia de cocatalizador.
N. Gnanaseelan y otros, 2020 [37]	Síntesis de compuestos MoS ₂ -TiO ₂ -óxido de grafeno reducido (MTG) y ceO ₂ -ce ₂ Ti ₃ O _{8.7} -TiO ₂ -óxido de grafeno reducido e incorporando nanopartículas de Mo y ce	La presencia del grafeno impulsó la producción H ₂ , obteniendo en MTG y CTG 363.83 μmol/g/h y 355.9 μmol/g/h. Aumentó efectivamente la fotogeneración de H ₂ .
J. Enrique y otros, 2021 [38]	Síntesis y caracterización del material híbrido g-C ₃ N ₄ /NiS, y su comportamiento fotocatalítico para la producción de H ₂	Tras 4 horas de irradiación uv se tiene un rendimiento de H ₂ con el fotocatalizador híbrido g-C ₃ N ₄ /NiS propuesto de 1230 mmol H ₂ /h.
Xinru Li Yao Ning Bai y otros, 2024, [39]	Implantación de nanocubos de plata uniformemente dispersos (35 nm) en srTiO ₃	El Ag@srTiO ₃ tiene una tasa de reducción de hidrógeno de hasta 457.5 μmol/g/h bajo luz solar simulada.
Meng Liu y otros, 2024, [40]	Nanopartículas (NP) de Au decoradas con material hueco poroso srTiO ₃ rico en defectos de oxígeno utilizando un método hidrotérmico asistido por grabado ácido	Se logró una eficiencia de producción de hidrógeno de 850 μmol/g/h con un 7.2 % bajo irradiación infrarroja cercana.

La ingeniería de nuevos materiales semiconductores y la modificación de los ya existentes mediante técnicas como el dopaje, la formación de heteroestructuras o el uso de cocatalizadores para mejorar la eficiencia, la estabilidad y la capacidad de aprovechar la luz solar es un campo de investigación emergente prometedor dada la diversidad de aplicaciones potenciales. Los datos presentados en las Tablas 2 y 3 muestran que la modificación de los semiconductores resulta en un incremento significativo en la producción de hidrógeno, así como en su eficiencia para diversas aplicaciones.



Conclusiones

El hidrógeno se presenta como una alternativa viable en la búsqueda de fuentes de energía limpias y renovables, con un potencial considerable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales. En este contexto, los materiales semiconductores fotocatalíticos, particularmente las perovskitas, han emergido como una innovación prometedora para la producción de hidrógeno a través de la división de la molécula de agua. Dicho compuesto destaca por su alta absorción de luz y sus propiedades electrónicas ajustables, conformándose como una opción atractiva para la fotocatalisis. Las modificaciones estructurales y químicas, como el control de defectos cristalinos o el dopaje con metales, pueden mejorar aún más su estabilidad bajo condiciones de reacción y su eficiencia al generar portadores de carga. No obstante, persisten desafíos que deben superarse para alcanzar su máximo potencial y asegurar una implementación práctica y sostenible. Entre estos retos se incluyen la optimización de la estabilidad, la minimización de la recombinación de portadores de carga, e incluso la síntesis para obtener los materiales tipos perovskitas. Por lo tanto, los avances en la investigación de materiales, incluyendo el desarrollo de nuevas perovskitas, y la ingeniería de procesos son cruciales para mejorar la eficiencia y estabilidad de los semiconductores fotocatalíticos, facilitando así su aplicación en la producción a gran escala de hidrógeno.

Referencias

- [1] J. A. Turner, "A Realizable Renewable Energy Future", *Science*, vol. 305, núm. 5686, pp. 972-974, 2004, doi: 10.1126/science.285.5428.687
- [2] G. A. Rivera Vargas, Y. Matsumoto-Kuwabara y R. Baquero Parra, "Análisis para la obtención de hidrógeno a partir de biogás proveniente de la fermentación de bebidas naturales", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, núm. 2, pp. 251-256, 2016, doi: 10.1016/j.riit.2016.06.009
- [3] A. Fujishima y K. Honda, "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode", *Nature*, vol. 238, núm. 5358, pp. 37-38, 1972, doi: 10.1038/238037a0
- [4] R. S. Dirzo y R. S. Casarín, "Combustible hidrógeno para el ciclo Rankine", *Educ. Quím.*, vol. 20, núm. 2, pp. 176-181, 2009, doi: 10.1016/S0187-893X(18)30024-7
- [5] Q. Wang *et al.*, "Scalable water splitting on particulate photocatalyst sheets with a solar-to-hydrogen energy conversion efficiency exceeding 1%", *Nature Materials*, vol. 15, núm. 6, pp. 611-615, 2016, doi: 10.1038/nmat4589
- [6] X. Chen, S. Shen, L. Guo y S. S. Mao, "Semiconductor-based photocatalytic hydrogen generation", *Chemical Reviews*, vol. 110, núm. 11, pp. 6503-6570, 2010, doi: 10.1021/cr1001645
- [7] L. F. G. Giraldo, E. A. M. Franco y J. J. S. Arango, "La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales", *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 1, núm. 1, pp. 83-92, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69511013.pdf>.
- [8] S. A. Azevedo, J. A. S. Laranjeira, J. F. Silva, E. Longo y J. R. Sambrano, "Ag-doped SrTiO₃: Enhanced water splitting for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 79, pp. 199-207, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.311
- [9] Su Z., F. Fang, X. Li, W. Han, X. Liu y K. Chang, "Synergistic surface oxygen defect and bulk Ti³⁺ defect engineering on SrTiO₃ for enhancing photocatalytic overall water splitting", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 626, pp. 662-673, 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2022.06.109
- [10] M. A. Kafeshani, V. Mahdikhah, y S. Sheibani, "Facile preparation and modification of SrTiO₃ through Ni-cd co-doping as an efficient visible-light-driven photocatalyst", *Optical Materials*, vol. 133, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.113080



- [11] H. Bentour, M. Boujnah, M. Houmad, M. El Yadari, A. Benyoussef y A. El Kenz, "DFT study of Se and Te doped SrTiO_3 for enhanced visible-light driven photocatalytic hydrogen production", *Optics and Quantum Electronics*, vol. 53, pp. 1-13, 2021, doi: 10.1007/s11082-021-03214-1
- [12] Y. L. Liu, C. L. Yang, M. S. Wang, X. G. Ma y Y. G. Yi, "Theoretical insight into the effect of Si-doped sites on the photocatalytic properties of SrTiO_3 ", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 125, pp. 1-9, 2019, doi: 10.1007/s00339-019-2668-8
- [13] A. Hernández Fernández, "Desarrollo de un prototipo para la monitorización de parámetros ambientales mediante sensores inalámbricos", Trabajo de fin de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2023. [En línea]. Disponible: https://oa.upm.es/75295/1/TFG_ADRIAN_HERNANDEZ_FERNANDEZ.pdf.
- [14] Z. Chu, W. Zhao, D. Xu, W. Liu, K. Han, Z. He y Y. Li, "The catalytic decomposition of CH_4 using ce-doped $\text{Fe}/\text{CaO}-\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ catalyst and its regeneration performance for H_2 production", *Separation and Purification Technology*, vol. 310, art. 129670, 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2023.129670
- [15] P. Porto Mato, "Descarbonización del sector del transporte en España con el hidrógeno verde", Trabajo de fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, 2021. [En línea]. Disponible: https://oa.upm.es/68685/1/TFG_PEDRO_PORTO_MATO.pdf.
- [16] N. Al Amri, A. Naquash, J. Haider y M. A. Qyyum, "A process efficiency enhancement of integrated H_2 liquefaction followed by CO_2 solidification: A 3E's analysis-Energy, Exergy, and Economic", *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 192, pp. 340-357, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.09.102
- [17] J. I. Linares Hurtado y B. Y. Moratilla Sora, *El hidrógeno y la energía*, Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, 2007. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=285044>.
- [18] International Energy Agency (IEA), *Global Hydrogen Review 2023*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.
- [19] J. I. Linares Hurtado y B. Y. Moratilla Soria, *El hidrógeno y la energía*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, 2007. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=285044>.
- [20] K. Jiménez Rangel, J. E. Samaniego Benítez, L. Lartundo Rojas, H. A. Calderón y A. Mantilla, "Ternary $\text{g}-\text{C}_3\text{N}_4/\text{NiOOH}/\text{Ag}$ nanocomposite photocatalyst with efficient charges separation and high activity for H_2 production", *Fuel*, vol. 280, art. 118672, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118672
- [21] J. D. B. Ruiz, "Producción de hidrógeno e hidrocarburos de cadena corta renovables mediante fotocatalisis", Tesis de doctorado, UAQ, Querétaro, México, 2023. [En línea]. Disponible: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2644>.
- [22] M. Trejo, "Síntesis de fotocatalizadores soportados de óxido de tungsteno por el método de sol-gel y su aplicación en la degradación de colorantes", Tesis de maestría, CICATA-Querétaro, Querétaro, México, 2019. [En línea]. Disponible: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/30306/Maria%20Guadalupe%20Trejo%20Perez.pdf>.
- [23] R. J. Candal, S. A. Bilmes y M. A. Blesa, "Semiconductores con actividad fotocatalítica", en *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, M. I. Litter, Ed., Madrid: CIEMAT, 2004, pp. 79-101. [En línea]. Disponible: <https://psa.es/en/units/stw/projects/solwater/files/CYTED01/10cap04.pdf>.
- [24] Y. Jiménez Flores, K. Jiménez Rangel, J. E. Samaniego Benítez, L. Lartundo Rojas, H. A. Calderón, R. Gómez y A. Mantilla, "Novelty $\text{g}-\text{C}_3\text{N}_4/\text{HAP}$ composite as highly effective photocatalyst for Cr(VI) photoreduction", *Catalysis Today*, vol. 388, pp. 168-175, 2022, doi: 10.1016/j.cattod.2020.07.045
- [25] Y. W. Teh, M. K. T. Chee, X. Y. Kong, S. T. Yong y S. P. Chai, "An insight into perovskite-based photocatalysts for artificial photosynthesis", *Sustainable Energy and Fuels*, vol. 4, núm. 3, pp. 973-984, 2020, doi: 10.1039/c9se00526a
- [26] R. E. Cohen, "Origin of ferroelectricity in perovskite oxides", *Nature*, vol. 358, núm. 6382, pp. 136-138, 1992, doi:10.1038/358136a0
- [27] Y. Zhang, W. Xu, B. Zhang, J. Xu y G. Zhu, "Enhanced photocatalytic performance of TiO_2 loaded with Ag nanoparticles under visible light irradiation", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, núm. 10, pp. 8233-8240, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.10.188
- [28] J. C. Duran Álvarez, E. Avella y R. Zanella, "Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos", *Revista interdisciplinaria en nanociencia y nanotecnología*, 2020, doi: 10.22201/cei-ich.24485691e.2015.14.52510
- [29] F. E. Ahmed, R. Hashaikeh y N. Hilal, "Solar powered desalination - Technology, energy and future outlook", *Desalination*, vol. 453, pp. 54-76, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2018.12.002
- [30] J. Schneider *et al.*, "Understanding TiO_2 photocatalysis: mechanisms and materials", *Chem. Rev.*, vol. 114, pp. 9919-9986, 2014, doi: 10.1021/cr500189z
- [31] A. R. Khataee y M. B. Kasiri, "Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide: influence of the chemical structure of dyes", *J. Mol. Catal. A Chem.*, vol. 328, pp. 8-26, 2010, doi: 10.1016/j.molstruc.2019.127115
- [32] Q. Guo, C. Zhou, Z. Ma y X. Yang, "Fundamentals of TiO_2 photocatalysis: concepts, mechanisms, and challenges", *Adv. Mater.*, 2019, doi: 10.1002/adma.201901997
- [33] Z. Li, X. Meng y Z. Zhang, "Recent development on MoS_2 -based photocatalysis: a



- review", *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, vol. 35, pp. 39-55, 2018, doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2017.12.002
- [34] L. Wang *et al.*, "Hydrogen production performance of active ce/n co-doped sr₂ti₃o₇ for photocatalytic water splitting", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, núm. 92, pp. 39047-39057, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.076
- [35] Z. Li *et al.*, "Interface redox-induced synthesis of sr₂ti₃o₇/α-Fe₂O₃ for much improved hydrogen production", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 963, art. 171189, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.171189
- [36] H. Bentour, K. Belasfar, M. Boujnah, M. El Yadari, A. Benyoussef y A. El Kenz, "DFT study of se/mn and te/mn codoped sr₂ti₃o₇ for visible light-driven photocatalytic hydrogen production", *Optical Materials*, vol. 129, art. 112431, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112431.
- [37] L. A. G. E. Vento Lujano, "Defect-induced modification of band structure by the insertion of ce³⁺ and ce⁴⁺ in sr₂ti₃o₇: A high-performance sunlight-driven photocatalyst", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 857, art. 157602, 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151044
- [38] J. E. Samaniego Benítez, K. Jiménez Rangel, L. Lartundo Rojas, A. García García y A. Mantilla, "Enhanced photocatalytic H₂ production over g-c₃n₄/nis hybrid photocatalyst", *Materials Letters*, vol. 290, art. 129476, 2021, doi: 10.1016/j.matlet.2021.129476
- [39] X. Li *et al.*, "Monodisperse silver nanocubes composite Ag@c/sr₂ti₃o₇ photocatalytic decomposition of water for hydrogen reduction", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 325, art. 129746, 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129746
- [40] M. Liu *et al.*, "Au nanoparticles decorated sr₂ti₃o₇-x hollow structure for plasmonic enhanced hydrogen production in UV-visible and near-infrared region", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 983, art. 173859, doi: 10.1016/j.jallcom.2024.173859
- [41] T. Kong *et al.*, "Recent advances and mechanism of plasmonic metal-semiconductor photocatalysis", *Rsc Advances*, vol. 14, núm. 24, pp. 17041-17050, 2024, doi: 10.1039/D4RA02808B



PEROVSKITAS Y EL FACTOR DE TOLERANCIA: LA CIENCIA DETRÁS DE LA INNOVACIÓN

Perovskites and the tolerance factor: the science behind the innovation

Martín Adrián Cortés Cuán*
Rufino Nava Mendoza
Carlos Martín Cortés Romero
María de los Ángeles Cuán Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México

*martincortescuan@gmail.com

02



Resumen

El presente artículo profundiza el papel esencial del factor de tolerancia en las perovskitas y cómo la comprensión de este concepto ha impulsado innovaciones significativas en la síntesis de nanomateriales. Examina los principios teóricos que definen estos minerales, con énfasis en dicho factor, puesto que es un parámetro crucial de los atributos estructurales y de estabilidad. Se destacan descubrimientos angulares e investigaciones entorno a la evolución del conocimiento de las propiedades físicas y electrónicas de las perovskitas. En cuanto al factor de tolerancia se establece la correlación entre la estructura cristalina y la composición química basada en los

radios iónicos de los elementos que los constituyen; no obstante, puede ajustarse para el diseño de perovskitas con propiedades y funcionalidades específicas para diversos fines. Se detallan algunas aplicaciones prácticas y avances tecnológicos que se han alcanzado gracias a este conocimiento científico; por ejemplo, la optimización en la eficiencia y estabilidad de las celdas solares, con impactos potenciales en la industria. Esta perspectiva multidisciplinaria subraya el papel crítico de la investigación científica para impulsar la innovación en la tecnología de materiales.

.....
Palabras clave: aplicaciones, eficiencia, factor de tolerancia, innovaciones, perovskitas, propiedades.

Abstract

This article delves into the essential role of the tolerance factor in perovskites and how the understanding of this concept has driven significant innovations in the synthesis of nanomaterials. It examines the theoretical principles that define these minerals, with an emphasis on the tolerance factor as a crucial parameter of structural and stability attributes. Key discoveries and research regarding the evolving understanding of the physical and electronic properties of perovskites are highlighted. The tolerance factor establishes the correlation between the crystal structure and chemical composition based on the

ionic radii of the constituent elements; furthermore, it can be tuned to design perovskites with specific properties and functionalities for various purposes. Some practical applications and technological advances that have been achieved thanks to this scientific knowledge are highlighted; for example, the improvement in the efficiency and stability of solar cells, with potential impacts on industry. This multidisciplinary perspective underscores the critical role of scientific research in driving innovation in materials technology.

.....
Keywords: applications, efficiency, tolerance factor, innovations, perovskites, properties.



Introducción

Contexto histórico de las perovskitas

La historia de las perovskitas abarca casi dos siglos de descubrimientos, avances científicos y aplicaciones tecnológicas. Comienza en 1839 con el descubrimiento de un mineral óxido (Figura 1) en los montes Urales de Rusia, realizado por el mineralogista y político ruso, el conde Lev Aleksevich Perovski [1]. La industria minera en el Imperio ruso le pertenecía al ministerio de Appanage, donde Perovski, además de ser uno de los fundadores del *Mining Journal*, hizo valiosas contribuciones a la minería lapidaria, gracias a las cuales se explotaron numerosos depósitos [1].

FIGURA 1.
Mineral perovskita
de CaTiO_3 [1].



Perovski observó que este mineral poseía una estructura cristalina única formada de calcio y titanio con la fórmula química CaTiO_3 [1]; además, la composición era notablemente simple y combinaba elementos de relativa abundancia. Este óxido ostenta una dureza alrededor de 5.5 en la escala de Mohs, una densidad de $\sim 4.0 \text{ g/cm}^3$ y un brillo vítreo a resinoso que varía en color desde tonalidades amarillas y marrones hasta grisáceos [2]. Aunque su descubridor no encontró aplicaciones específicas para las perovskitas durante su tiempo, ya que centró su atención a la identificación y clasificación de minerales, sí inspiró a otros investigadores a adentrarse y explorar las propiedades excepcionales de estos materiales [1].

Después de su descubrimiento, se ha logrado sintetizar una amplia gama de perovskitas con composiciones y propiedades diversas, como la ferroelectricidad, el ferromagnetismo, la superconductividad y la fotoconductividad [5]. También se han implementado en la manufactura de dispositivos electrónicos, catalizadores y sistemas de almacenamiento de energía [3], [4], [21]. En las últimas décadas transcurridas, las perovskitas, especialmente las halogenadas, han cobrado relevancia en el campo de la energía solar, pues exhiben eficiencia en células captadoras de película delgada [21].



Contexto histórico de las perovskitas

Las perovskitas tienen una fórmula química general ABX_3 , donde A y B son cationes metálicos y X es un anión, típicamente oxígeno [5]. Los compuestos $KTaO_3$, $NaTaO_3$, $NbNbO_3$, $BaMnO_3$, $BaZrO_3$, $SrTiO_3$, $KMnF_3$ y $KFeF_3$ cuentan con una estructura ideal cúbica (Figura 3); no obstante, las variantes $BiAlO_3$, $PbSnO_3$, $BaTiO_3$, $PdTiO_3$ exhiben geometrías distorsionadas hexagonales u ortorrómbicas, cuya simetría es inferior. Por otro lado, las $LaAlO_3$ y $GdFeO_3$ poseen una red romboédrica [8]. Asimismo, en muchos compuestos se ha observado una deficiencia de átomos de oxígeno en la red cristalina. Debido a su energía reticular, se clasifican como óxidos de perovskita. Estas distorsiones en la estructura pueden originar propiedades como el ferromagnetismo o la ferroelectricidad [4].

FIGURA 2.

Estructuras de las perovskitas, en orden [6]:
 $BaTiO_3$
 $LaAlO_3$
 Sr_2GdRuO_6

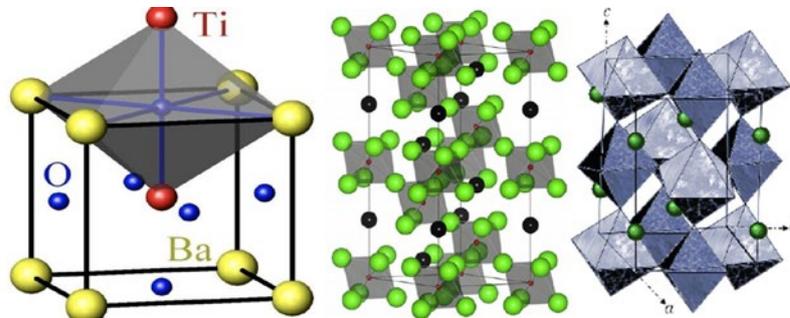
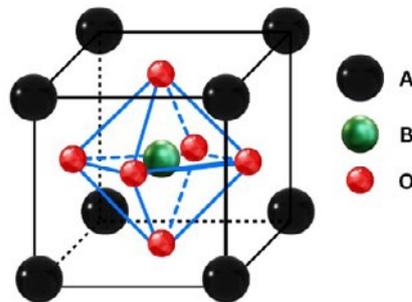


FIGURA 3.

Estructura geométrica de las perovskitas ABO_3 dibujada, estableciendo los cationes A como vértices de la celda de Bravais, mostrando el octaedro BO_6 ubicado en el cubo del catión A. Adaptado de [5].



La composición química específica y las condiciones de temperatura-presión en que se forman generarán fases como la tetragonal, la monoclinica o la triclinica [9]. Así, es posible transformar las propiedades geométricas y electrónicas de las perovskitas para adaptarlas a las necesidades de diferentes campos. A modo de ejemplo, el catión metálico que ocupa la posición A es de gran tamaño; al sustituirlo se alteran las dimensiones y las propiedades electrónicas del material, como la carga y la conductividad eléctrica, al igual que las propiedades magnéticas [3]. Por otra parte, en el sitio B se encuentran cationes de menor tamaño, y su reemplazo puede alterar el ancho de banda o la capacidad de inducción magnética [3]. Por último, el control del contenido de oxígeno y de la estequiometría también impactan en las características estructurales y propiedades de la perovskita. En específico, las vacancias de



oxígeno causadas por los tratamientos químicos permiten llegar a modificar la conductividad eléctrica, la actividad catalítica y la estabilidad [10]. En la Figura 4 se esquematizan algunas sustituciones posibles en cada sitio.

FIGURA 4.
Ejemplos de posibles elementos de sustitución en la estructura ABX de las perovskitas.
Elaboración Propia.

Cationes A		Posibles sustituciones	
Litio	Rubidio		
Sodio	Cesio		
Potasio	Estroncio		
Cationes B		Posibles sustituciones	
Vanadio	Germanio	Titanio	
Niobio	Estaño	Zirconio	
Talio	Plomo		
Aniones		Posibles sustituciones	
Oxígeno	Flúor		
Azufre	Cloro		
Selenio			

Discusión

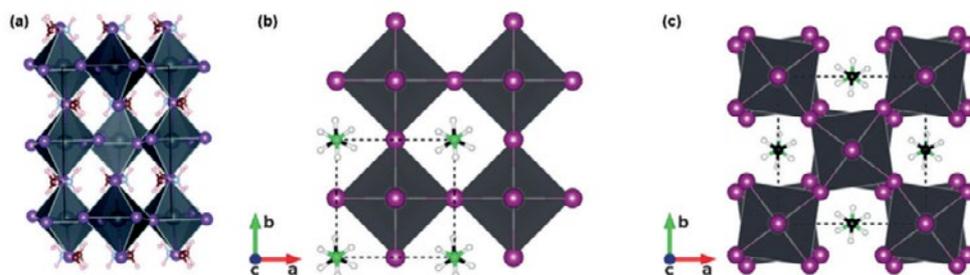
La inclusión de perovskitas en celdas solares ha demostrado acrecentar la eficiencia en la conversión de la luz solar a electricidad; además brinda resistencia a la degradación bajo condiciones operativas [7], siempre y cuando los materiales cuenten con una pureza alta. Cuando la estructura es cristalina proporciona una plataforma sólida para la absorción de luz y la generación de portadores de carga. Como caso de muestra, la perovskita híbrida $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (Figura 5) [11] ha alcanzado una eficiencia un poco mayor al 25 %, aunque se encuentra en una etapa temprana de desarrollo y aún no es tan prevalente en la manufactura y comercialización de células solares como el silicio monocristalino [12].

Todavía en 2021, la rentabilidad, la fácil fabricación y el moderado impacto ambiental de las celdas solares a base de perovskitas eran solo una expectativa [13]. En nuestros días, Panasonic Holdings Corporation encabeza un proyecto a largo plazo para la implementación de vidrios fotovoltaicos integrados con perovskita en la Fujisawa Sustainable Smart Town en Kanagawa, Japón. El proyecto se centra en la verificación técnica y la durabilidad de las celdas, que están diseñadas para integrarse en la arquitectura urbana, sobre todo en ventanas y fachadas de edificios. La tecnología basada en perovskitas desarrollada por Panasonic permite la generación de energía en superficies de vidrio, subsanando así la limitante del espacio propia de las urbes y contribuyendo a la resiliencia de la cadena de suministro energético durante desastres naturales [13], [14]. Por si fuera poco, estos materiales se sintetizan a bajos costos, ya que los procesos son simples; su rentabilidad los hace atractivos para aplicaciones comerciales a gran escala.



FIGURA 5.

Estructura atómica de la perovskita $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:
 (a) tetragonal
 (b) cúbica
 (c) fase perovskita [11]



Uno de los 17 objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible es adoptar medidas para combatir el cambio climático y sus efectos; bajo esa consigna, hay un esfuerzo continuo por encontrar soluciones energéticas más sostenibles y fuentes limpias y renovables [17]. Las perovskitas son una alternativa promisoría para satisfacer dicha necesidad [18].

Las aplicaciones de estos compuestos abarcan los ámbitos de la electrónica avanzada, como la computación cuántica y la optoelectrónica [15]. A su vez, Sekisui Chemical, otra empresa japonesa, lleva el desarrollo de celdas solares de perovskita con una eficiencia de conversión de alrededor el 15 %; se planea integrarlas en dispositivos portátiles y automóviles, con una vida útil prevista de diez años [16]. Las pruebas piloto se están efectuando en Osaka, utilizando tecnología de empaquetado de semiconductores para desarrollar capas generadoras de energía más duraderas y resistentes a la humedad.

Como se mencionó, los atributos de las perovskitas son potenciables al adicionar cationes metálicos como dopantes [19]. No obstante, en el proceso son imprescindibles la homogeneidad de la muestra y la correcta sustitución de dichos cationes; los dopantes pueden alterar la estructura electrónica, así como las propiedades ópticas del compuesto, lo que conlleva a crear funciones personalizadas para aplicaciones específicas. En consecuencia, es menester conocer los parámetros de síntesis de las reacciones para optimizar la formación de las perovskitas dopadas [8].

Existen diferentes métodos de síntesis, entre los cuales se encuentra el de coprecipitación, que ocurre cuando los cationes dopantes se mezclan con las soluciones del reactante y se coprecipitan por oxalatos o carbonatos. Este proceso asegura que los reactantes, incluyendo los dopantes, se encuentren en un estado homogéneo. La perovskita se obtiene tras la calcinación de los coprecipitados [20]. Otra vía es la reacción de microemulsión, la cual es una mezcla de tres componentes: agua, un solvente orgánico y un agente emulsionante (típicamente un surfactante), y proporciona un entorno favorable para la nucleación y el crecimiento de los cristales de perovskita. La selección de los componentes y sus proporciones no solo es crucial para que la mixtura sea estable, sino que también determina la composición química final de la perovskita. Una vez formada la microemulsión, se disuelven los precursores (sales metálicas y compuestos orgánicos) en la fase



dispersa. Las suspensiones se lavan con acetona para remover los surfactantes y se congelan en seco para obtener los polvos de perovskita [20].

Además de los métodos descritos arriba, actualmente se han definido nuevas formas de dopar estos materiales con un menor costo energético: sol-gel, hidrotermales, síntesis a presiones altas y activación mecánica. Si bien todas comparten la finalidad de sintetizar perovskitas, cada proceso genera una formulación química con distintas simetrías cristalinas o incluso estructuras [6].

Factor de tolerancia en las perovskitas

Desde 1926 se ha enfocado el estudio de las perovskitas en encontrar una explicación para su diversidad estructural. Con ese fin, el grupo de Goldsmith [7] adaptó y expandió la idea de clasificar las estructuras en función de la distancia entre los radios de los iones. Hoy día la técnica sigue vigente para los compuestos de perovskitas, y ahora dicha medida se conoce como el factor de tolerancia (t_f). Se trata de un parámetro adimensional que muestra la proporción de radios iónicos en los sitios de los cationes A y B en la posición del oxígeno, y se correlaciona con la estructura cristalina. El factor brinda una idea de la estabilidad y las características estructurales que adquirirá el compuesto [3]; su ecuación está dada por (1) [21]:

$$t_f = \frac{r_A + r_0}{2^{1/2}(r_b + r_0)} \quad (1)$$

Donde:

r_A es el radio iónico del catión en el sitio A

r_b es el radio iónico del catión en el sitio B

r_0 es el radio iónico del anión de oxígeno

En una muestra ideal de perovskita ($t_f = 1$), los radios iónicos en los sitios A y B forman una estructura perfectamente estable [6]. Por otro lado, cuando t_f se desvía en gran medida de 1 (fuera del rango de 0.8 a 1.0), las unidades octaédricas conformadas por los aniones y cationes se inclinan o giran puesto que se genera tanta tensión estructural que la geometría de los cristales se deforma para mantener la estabilidad [6]. En casos extremos, cuando la relación de oxígeno dentro de la fórmula ABO_3 es menor o igual que 2.5, el material puede incluso no tener estructura de perovskita [6]. Asimismo, un t_f dentro del rango 0.8-1.0 indica que los iones pueden empaquetarse con propiedad, permitiendo la formación de enlaces adecuados para manifestar propiedades magnéticas [22]. Un valor cercano a 0.75 aún puede formar perovskitas, pero son menos comunes y estables [23]; por ejemplo, el alumi-



nato de itrio YAlO_3 exhibe deformaciones debido al tamaño relativamente pequeño del ion A (Y^{3+}) en comparación con el ion B (Al^{3+}) y el oxígeno, lo cual produce una geometría ortorrómbica [24].

El factor de tolerancia es primordial para asegurar la estabilidad y el rendimiento de las perovskitas en aplicaciones industriales. Su influencia se extiende desde la estabilidad estructural hasta la eficiencia de conversión de energía y la viabilidad de fabricación. Así, constituye un parámetro central en el desarrollo y la optimización de materiales tipo perovskita.

Conclusiones

El factor de tolerancia es un índice confiable para predecir la estabilidad de una perovskita. Además, ayuda a comprender la relación entre la estructura cristalina y la composición química. Al ajustar deliberadamente los radios iónicos de los elementos, es factible modificar el factor de tolerancia para diseñar perovskitas con propiedades y funcionalidades específicas para diferentes aplicaciones. En la actualidad, la investigación en perovskitas abarca una amplia gama de disciplinas, desde la física y la química de materiales hasta la ingeniería de dispositivos y la energía renovable. Los científicos continúan explorando nuevas composiciones, estructuras y propiedades de las perovskitas, así como también buscan formas de mejorar su estabilidad y rendimiento para su aplicación en una variedad de tecnologías emergentes.

Agradecimientos

Martín Adrián Cortés Cuán agradece al Conahcyt por el apoyo durante la realización de sus estudios de maestría.

Referencias

- [1] E. A. Katz, "Perovskite: Name Puzzle and German-Russian Odyssey of Discovery", *Helvetica Chimica Acta*, vol. 3, núm. 6, 2020, doi: 10.1002/hlca.202000061
- [2] A. S. Bhalla, R. Guo, y R. Roy, "The perovskite structure — a review of its role in ceramic science and technology", *Materials Research Innovations*, vol. 4, núm. 1, pp. 3-26, 2000, doi: 10.1007/s100190000062
- [3] H. Park, R. Mall, F. H. Alharbi, S. Sanvito, N. Tabet, H. Bensmail, y F. El-Mellouhi, "Learn-and-Match Molecular Cations for Perovskites", *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 123, núm. 33, pp. 7323-7334, 2019, doi: 10.1021/acs.jpca.9b06208
- [4] A. M. Glazer, "Perovskites modern and ancient", *Structural Science, Crystal Engineering and Materials*, vol. 58, núm. 6, p. 1075, 2002, doi: 10.1107/S0108768102020220
- [5] Z. L. Wang y Z. C. Kang, "Perovskite and Related Structure Systems", en *Functional and Smart Materials*, Nueva York, Estados Unidos: Plenum Press, 1998.
- [6] C. Moure y O. Peña, "Recent Advances in Perovskites: Processing and Properties",



- Progress in Solid State Chemistry*, vol. 43, núm. 4, pp. 123-148, 2015, doi: 10.1016/j.progso-lidstchem.2015.09.001
- [7] C. J. Bartel, C. Sutton, B. R. Goldsmith, R. Ouyang, C. B. Musgrave, L. M. Ghiringhelli, y M. Scheffler, "New tolerance factor to predict the stability of perovskite oxides and halides", *Science Advances*, vol. 5, núm. 2, 2019, doi: 10.1126/sciadv.aav0693
- [8] T. Ishihara, "Structure and Properties of Perovskite Oxides", en *Perovskite Oxide for Solid Oxide Fuel Cells*, Massachusetts, Estados Unidos: Springer, 2009.
- [9] J. A. Smith y M. L. Johnson, "Crystal phases of perovskites and their properties", *Journal of Materials Science*, vol. 35, núm. 12, 2000.
- [10] M. A. Peña y J. L. G. Fierro, "Chemical Structures and Performance of Perovskite Oxides", *Chemical Reviews*, vol. 101, núm. 7, pp. 1981-2017, 2001, doi: 10.1021/cr980129f
- [11] S. Yun, X. Zhou, J. Even y A. Hagfeldt, "Theoretical Treatment of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Solar Cells", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 56, núm. 50, 2017, doi: 10.1002/anie.201702660
- [12] N. Suresh Kumar y K. Chandra Babu Naidu, "A review on perovskite solar cells (pssc), materials and applications", *Journal of Materials*, vol. 7, núm. 5, pp. 940-956, 2021, doi: 10.1016/j.jmat.2021.04.002
- [13] Panasonic Holdings Corporation, "Panasonic Holdings Corporation to Start the World's First* Long-term Implementation Demonstration Project for the Building Integrated Perovskite Photovoltaics Glass in the Fujisawa Sustainable Smart Town", *Panasonic Newsroom Global*, 2023. [En línea]. Disponible en <https://news.panasonic.com/global/press/en230831-2>.
- [14] The Government of Japan, "Japan's Long-planned Photovoltaics: Space-Based Solar Power and Perovskite Solar Cells", *KIZUNA*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.japan.go.jp/kizuna/2023/08/japans_long-planned_photovoltaics.html.
- [15] Y. Zhao y K. Zhu, "Organic-inorganic hybrid lead halide perovskites for optoelectronic and electronic applications", *Chemical Society Reviews*, vol. 45, núm. 3, pp. 655-689, 2016, doi: 10.1039/c4cs00458b
- [16] S. Fichtner, "Japanese enterprise is working on perovskite solar cells for automotive application", *Solarbe Global*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.solarbeglobal.com/japanese-enterprise-is-working-on-new-solar-cells-for-automotive-application/>.
- [17] Naciones Unidas, "Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible", 2015. [En línea]. Disponible en: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf.
- [18] D. S. Ahmed, M. K. A. Mohammed y S. M. Majeed, "Green Synthesis of Eco-Friendly Graphene Quantum Dots for Highly Efficient Perovskite Solar Cells", *ACS Applied Energy Materials*, vol. 3, núm. 11, 2020, doi: 10.1021/acsaem.0c01896
- [19] S. Royer, D. Duprez, F. Can, X. Courtois, C. Batiot-Dupeyrat, S. Laassiri y H. Alamdari, "Perovskites as Substitutes of Noble Metals for Heterogeneous Catalysis: Dream or Reality", *Chemical Reviews*, vol. 114, núm. 20, 2014, doi: 10.1021/cr500032a
- [20] J. Cai, K. Laubernds, F. S. Galasso, S. L. Suib, X. F. Shen, E. Begge, H. R. Kunz y J. M. Fenton, "Preparation Method and Cation Dopant Effects on the Particle Size and Properties of BaCeO_3 Perovskites", *Journal of The American Ceramic Society*, vol. 88, núm. 10, 2008, doi: 10.1111/j.1551-2916.2005.00521.x.
- [21] N. S. Arul y V. D. Nithya, *Revolution of Perovskite Synthesis, Properties and Applications*, Singapur: Springer, 2020.
- [22] D. B. Mitzi, C. A. Feild, W. T. A. Harrison y A. M. Guloy, "Conducting tin halides with a layered organic-based perovskite structure", *Nature*, vol. 369, pp. 467-469, 1994, doi: 10.1038/369467a0
- [23] P. M. Woodward, "Octahedral Tilting in Perovskites. I. Geometrical Considerations", *Acta Crystallographica Section B: Structural Science*, vol. 53, núm. 1, pp. 32-43, 1997, doi: 10.1107/S0108768196010713
- [24] X. Zhao y Y. Zhu, "Effect of A-site cation size on the structure and dielectric properties of rare earth aluminates", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 97, núm. 1, pp. 246-252, 2014.



PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SUSTENTABLE DE AVIACIÓN A PARTIR DE BIOMASAS RESIDUALES Y ACEITE DE INSECTOS: UNA REVISIÓN

Sustainable aviation fuel production from waste biomass and insect oil:
a review

Juan Jesús Reséndiz Luna
Claudia Gutiérrez Antonio
Valeria Caltzontzin Rabell*

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro México

*valeria.caltzontzin@uaq.mx

03



Resumen

En el sistema de transporte, la industria de la aviación ha tomado el liderazgo en la búsqueda de nuevas alternativas que atenúen su impacto en el cambio climático, y ha puesto en marcha iniciativas para impulsar su desarrollo sostenible, dentro de las cuales destaca el combustible sustentable de aviación (SAF). El SAF se obtiene de la biomasa a través de diversas rutas de procesamiento; la más directa es el hidrotreamiento de grasas y aceites. Empero, la disponibilidad global de materias primas ricas en triglicéridos es baja, respecto de los materiales lignocelulósicos. Estos últimos son atractivos debido a su abundancia y asequibilidad, pero no son hidropocesables de

forma directa por causa de su bajo contenido de lípidos. Por tanto, se ha explorado un tratamiento biológico que permite transformar a parcialidad la materia lignocelulósica en grasas hidrotreatables. Así mismo, la conversión biológica de residuos lignocelulósicos por medio de la cría de la mosca soldado negra (LMSN) actúa como una alternativa para generar grasas útiles en la producción de combustible sustentable de aviación. El presente trabajo expone una revisión sobre la producción de combustible sustentable de aviación a partir de materias primas residuales, enfatizando el uso de grasas de LMSN.

Palabras clave: biocombustible, biomasa, combustible sustentable de aviación, *Hermetia illucens*, larva de mosca soldado negra, residuos.

Abstract

In the transportation sector, the aviation industry has taken the lead in the search for alternatives to help mitigate the impact on climate change, and has launched initiatives to promote its sustainable development, among which sustainable aviation fuel (SAF) stands out. SAF is distilled from biomass through several processing routes, the most direct of which is the hydrotreating of fats and oils. Nevertheless, global availability of triglyceride-rich feedstocks is lower, respect to lignocellulosic materials. The latter are attractive because of their abundance and low

cost, but are not directly hydroprocessable because of their low lipid content. Therefore, a biological treatment has been explored to partially transform lignocellulosic material into hydroprocessable fats. Likewise, the biological conversion of lignocellulosic residues through the breeding of the black soldier fly (BSFL) represents an alternative to generate fats useful in the production of sustainable aviation fuel. This article presents a review on the production of sustainable aviation fuel from waste feedstocks, with special emphasis on BSFL fats.

Keywords: biomass, biofuel, sustainable aviation fuel, *Hermetia illucens*, black soldier fly larvae, waste.



Introducción

En décadas recientes, más del 80 % de la energía necesaria para la sociedad se ha extraído de combustibles fósiles [1]. La agencia internacional de energía estadounidense (IEA) propone el Escenario de políticas declaradas (Stated Policies Scenario o STEPS), donde exhibe las directrices que han de implementarse para mitigar el cambio climático; tal esquema prevé que los combustibles fósiles representarán el 75 y el 60 % del consumo de energía en los años 2030 y 2050 [2]. Otro modelo presentado por la IEA es el denominado Cero emisiones netas en 2050 (Net Zero Emissions by 2050 o NZE): un plan para estabilizar el aumento de la temperatura mundial en 1.5 °C, así como abrir el acceso universal a la electricidad y los sistemas modernos de energía para 2023 [2]. Se contemplan proyectos de descarbonización por medio de tecnologías energéticas limpias basados en costos, condiciones del mercado y preferencias políticas. Ese panorama refleja las circunstancias particulares de los distintos países en términos de disponibilidad de recursos, infraestructura e influencia política [2].

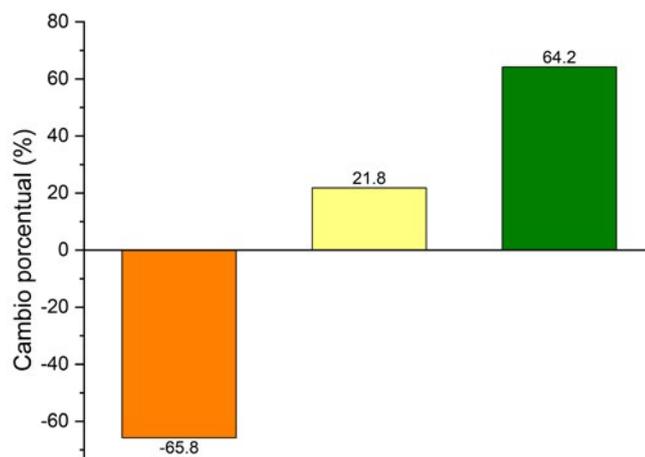
El sector transporte acapara una cuarta parte del consumo energético total y es responsable del 40 % de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente debido a los combustibles derivados del petróleo que predominan en dicha industria. En 2021, las emisiones de CO₂ globales para este sector disminuyeron de 7.7 Gt a 7.1 respecto de 2020, gracias a las restricciones de movilidad impuestas por la pandemia de covid-19 [2]. La descarbonización en este sector, de acuerdo con el NZE, depende de dos cambios principales: uno es el uso prioritario de vehículos eléctricos y celdas de hidrógeno para la movilidad por carretera; el otro, la mezcla y aprovechamiento de combustibles de bajas emisiones, tales como los biocombustibles.

En específico, la aviación depende en gran parte del petróleo, ya que la turbosina, el combustible de los aviones, es de origen fósil. Como ocurrió en su contraparte terrestre, las emisiones aeronáuticas de CO₂ disminuyeron tras las restricciones sanitarias de movilidad; aunque, también hubo un aumento de actividad en el tráfico de pasajeros, del 21.8 en 2021 a 64.2 % en 2022 (Figura 1) [3].



FIGURA 1.

Tráfico anual de pasajeros a nivel mundial. Adaptado de [3].



De acuerdo con la IEA, el crecimiento de la actividad del sector aviación se mantendrá alrededor del 2.5 % anual hasta 2050, tendencia que se ha observado desde 2019. En este contexto, el combustible sustentable de aviación (SAF), también conocido como bioturbosina, es una alternativa para satisfacer las necesidades energéticas resultantes [2], [4]. En contraste, la turbosina convencional, destilada a partir del petróleo, se estructura por cadenas de hidrocarburos del C_8 a C_{16} y tiene como principales componentes químicos a los alcanos, isoalcanos, naftenos y aromáticos. La bioturbosina consta también de cadenas de hidrocarburos en el rango de puntos de ebullición del C_8 a C_{16} , pero se produce a partir de biomasa, contiene menos azufre (por lo que genera menos emisiones contaminantes) y puede o no contener compuestos aromáticos, dependiendo de la materia prima y la ruta de procesamiento [5]. Además, las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la producción y uso de combustibles sustentables de aviación son entre 12 y 56 % menores que las reportadas para el combustible de aviación convencional [5].

El uso del SAF se acelerará en 2030; de hecho, se estima que en ese año más del 10 % del combustible de aviación será sustentable [2]. Además, se prevé que, para 2050, el SAF cubrirá casi el 45 % de la demanda, y los combustibles sintéticos con base en hidrógeno otro 25 %. En la actualidad se cuenta con inversiones en instalaciones, políticas, normas y créditos fiscales para favorecer la producción de SAF bajo criterios sustentables. Sin embargo, existen condicionantes para la viabilidad de los biocombustibles de aviación: deben ser producidos de recursos renovables no comestibles, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ser compatibles con los combustibles convencionales [6]. Otro aspecto por atender acerca del SAF es el costo de producción, el cual depende de las rutas de procesamiento empleadas.



Rutas de procesamiento

Existen diferentes métodos para la producción de bioturbosina. De acuerdo con la iniciativa de combustibles alternativos para la aviación comercial (CAAFI) las rutas certificadas se basan en la normativa ASTM D4054 [7] (Tabla 1). La producción de bioturbosina contempla procesos biológicos, químicos, bioquímicos y termoquímicos [6], [8]. Asimismo, la composición del SAF puede variar su contenido de aromáticos, debido a las propiedades de las materias primas y el método empleado. El contenido de los compuestos aromáticos no afecta las propiedades del biocombustible; sin embargo, la norma ASTM D7566 determina que el volumen máximo permisible de bioturbosina depende del contenido de aromáticos, dado que debe tenerse un contenido mínimo de 8.4 % vol. en el tanque [7], [9], [10]. Bajo esta perspectiva, de todas las rutas de procesamiento listadas en la Tabla 1, el hidrotreamiento de aceites y grasas es la más directa, económica y competitiva en el mercado.

TABLA 1.

Rutas de producción certificadas. Adaptado de [7]

RUTA DE PRODUCCIÓN	MATERIA PRIMA	MEZCLA MÁXIMA CON TURBOSINA CONVENCIONAL	AÑO DE APROBACIÓN
Keroseno parafínico sintético obtenido por síntesis de Fischer-Tropsch (FT-SPK)	Residuos de cultivos y sólidos	50 %	2009
Keroseno parafínico sintético obtenido por ácidos grasos y ésteres hidroprocesados (HEFA-SKP)	Lípidos	50 %	2011
Isoparafina sintética obtenida por azúcares fermentados hidroprocesados (HFS-SIP)	Azúcares y almidones fermentados	10 %	2014
Keroseno parafínico sintético con aromáticos obtenido por síntesis de Fischer-Tropsch (FT-SPK/A)	Residuos de cultivos y sólidos	50 %	2015
Keroseno parafínico sintético obtenido por alcohol (ATJ-SPK)	Azúcares y almidones fermentados	50 %	2016
Keroseno sintético obtenido por hidrotermólisis catálisis (CH-SK)	Lípidos	50 %	2020



RUTA DE PRODUCCIÓN	MATERIA PRIMA	MEZCLA MÁXIMA CON TURBOSINA CONVENCIONAL	AÑO DE APROBACIÓN
Keroseno parafínico sintético obtenido por hidrocarburos, ácidos grasos y ésteres hidroprocesados (HHC-SPK o HC-HEFA-SPK)	Algas	10 %	2020
Keroseno sintético con aromáticos obtenidos a partir de alcohol (ATJ-SKA)	Azúcares y almidones fermentados	50 %	2023

Por otro lado, las materias primas para la producción de SAF se clasifican por generaciones [8]. La primera comprende los productos comestibles como el maíz y la canola, pero su uso compite con la seguridad alimenticia y no se consideran viables por cuestiones éticas y legislativas en México. En adición, el aceite está compuesto por triglicéridos y ácidos grasos libres [11]. La segunda incluye materias con alto contenido de ácidos grasos que pueden convertirse en biocombustibles por medio del hidrotratamiento: biomasa lignocelulósica (como restos de cultivos), aceites residuales (de cocina o grasas animales) y aceites de cultivos no comestibles (como el de *Jatropha curcas* o *Ricinus communis*) que, aunque no entran en competencia directa con la industria alimenticia, sí requieren uso de suelo y agua para las cosechas; cabe añadir que también se procesan los residuos generados en los diferentes sectores económicos. Finalmente, la tercera generación consiste en microorganismos, tales como las algas, que contienen altos niveles de aceite, no requieren tierras cultivables y absorben CO₂ durante su crecimiento.

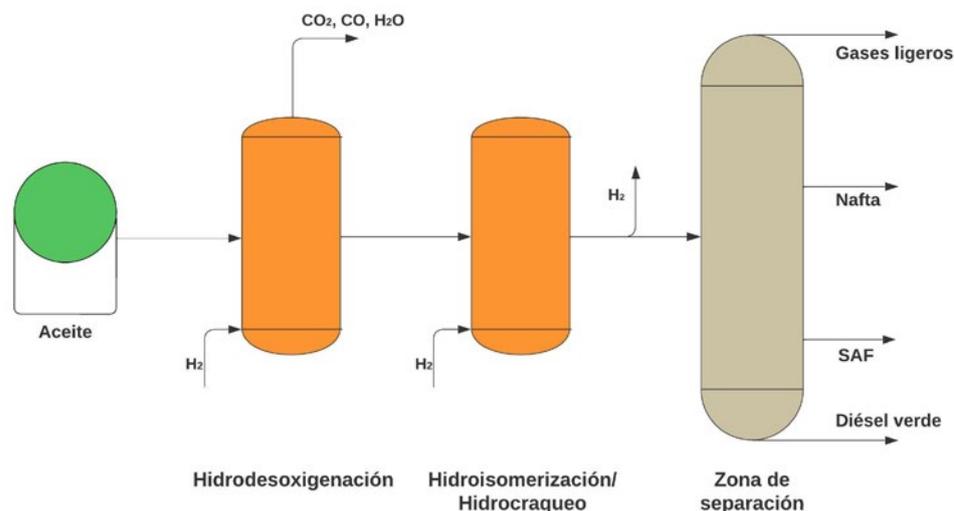
Proceso de hidrotratamiento

En el hidroprocesamiento los triglicéridos son transformados a SAF mediante procesos secuenciales con presencia del hidrógeno [5]: hidrodeshidrogenación, hidroisomerización e hidrocrackeo; como resultado se obtienen SAF, gases ligeros, naftas y diésel verde, que a su vez se separan a través de columnas de destilación. Asimismo, según las condiciones del proceso, catalizador y el tipo de materia prima utilizada, el SAF tendrá o no componentes aromáticos. En la Figura 2 se ilustra el hidrotratamiento para la producción de SAF. La hidrodeshidrogenación es una etapa fundamental, ya que consiste en remover el oxígeno presente de la materia prima para alcanzar el punto de congelación. Los productos de la reacción son hidrocarburos de cadena larga similares al diésel, junto con CO₂, H₂O y CO [5]. En la segunda etapa reactiva, es necesario seccionar esas cadenas en un rango de C₈ a C₁₆ mediante el hidrocrackeo y, posteriormente, isomerizarlas mediante la hidroisomerización.



Las condiciones operativas comunes para el hidrotreamiento incluyen presiones mayores a 20 bar con un rango de temperatura 300-350 °C, dependiendo de la materia prima y catalizador empleados. Sumado a ello, los catalizadores con mejor desempeño tanto en los hidrocarburos de origen fósil como en la producción de biocombustible son Pd/C y $\text{CoMo}/\gamma\text{-Al}_{203}$ [5].

FIGURA 2.
Proceso convencional del hidrotreamiento.
Adaptado de [5].



El uso de residuos para la producción de bioturbosina se destaca, pues el costo asociado a la materia prima puede representar hasta el 90 % del costo total anual del hidrotreamiento [5]. Este tipo de materia prima es una opción promisoriosa debido a que es asequible, pero sí debe considerarse el valor de la logística de recolección, así como del acondicionamiento de la materia prima. La Tabla 2 muestra las materias primas estudiadas por diversos autores para la obtención de SAF mediante el hidrotreamiento de ésteres y ácidos grasos, las cuales son en su mayoría lípidos residuales o aceites por pirólisis de desechos agrícolas en peso seco.

TABLA 2.
Materias primas residuales reportadas para la producción de SAF por hidrotreamiento.

MATERIA PRIMA	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (BAR)	REQUERIMIENTO DE HIDRÓGENO	CATALIZADOR	RENDIMIENTO SAF (%)	REFERENCIA
Aceite residual de cocina	275	75.8	50 ml H_2 / 50 ml aceite	CoMoS	95.00	[12]
Aceite de naranja	60	12	No especificado	Pt/ Al_2O_3	54.20	
Grasa de pollo	480	60	450 v H_2 /v aceite	NiW/ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	47.46	



MATERIA PRIMA	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (BAR)	REQUERIMIENTO DE HIDRÓGENO	CATALIZADOR	RENDIMIENTO SAF (%)	REFERENCIA
Grasa animal	400	40	1000 ml H ₂ /ml aceite	Pt/SAPO-11	Pt/SAPO-11	
Aceite residual de cocina	380	30.39	250 ml H ₂ /ml aceite	USY-AL-SBA-15 Ni/Mo	39.7	
Aceite residual vegetal	380-430	10-20	No especificado	Zirconia Sulfatada (HZSM-5); Catalizador Híbrido (HZSM-5)	10.65	[13]
Aceite de rastrojo de maíz	573	50	No especificado	Ni/ZrO ₂	90 (diésel y SAF)	
Aceite residual de cocina	400	30	350 ml H ₂ / ml aceite	Meso-Y; SAPO-34; HY	40.5	
Aceite residual de soya y palma	270	15	300 - 400 m ³ H ₂ / m ³ aceite	pd/beta-zeolita	40	
Aceite residual de cocina	390	138	1,068 nm ³ / m ³ aceite	Comercial presulfurizado + DMDS + TBA	<16.4	[14]
Aceite residual de cocina	380	30	250 ml H ₂ /ml aceite	NiMo/ USY@Al-SBA-15	30.54	[15]
Aceite residual del molido de palma	400	10	No especificado	Pd/Al ₂ O ₃	54	[16]
Aceite de cáscara de arroz	380	40	Relación H ₂ / aceite 1000	NiAg/SAPO-11	5.26	[17]
Aceite residual de cocina	360	450	No especificado	NiO-LizSM-5	80.42 % mol	[18]
Manteca residual de cerdo	400	50	Relación H ₂ / aceite 1000	Pt/SAPO-11	48.55	[19]
Aceite residual de girasol	550	No especificado	1000 ncm ³ / cm ³ aceite	ZSM-5	14.08	[20]
Aceite de semilla de algodón	500-550	No especificado	No especificado	WT	6.84	[21]



MATERIA PRIMA	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (BAR)	REQUERIMIENTO DE HIDRÓGENO	CATALIZADOR	RENDIMIENTO SAF (%)	REFERENCIA
Aceite residual de soya	370	50	Relación H ₂ /aceite 1500 ml	Ni-w/ SiO ₂ -Al ₂ O ₃	51.4	[22]
Aceite residual de cocina	420	100	H ₂ /aceite = 2200 NLgas/Líquido	Ni-Mo/ Sílica-alúmina	53.7	[23]
Aceite de residuos de cultivos	280	60	750 v H ₂ /v aceite	Pt/Al ₂ O ₃	87	[24]

En los estudios reportados se emplean triglicéridos de diferentes fuentes, puesto que la conversión de estos lípidos es la ruta más corta para la producción de bioturbosina, con hasta 95 % de rendimiento [12]. De modo similar, el uso de aceites obtenidos por pirólisis de residuos como el rastrojo de maíz reportado por [13] presenta un rendimiento productivo del 90 % diésel y SAF en conjunto. Además, el aceite obtenido por medio de la pirólisis, utilizando la semilla del algodón reportado por [21] obtuvo un rango parcial de bioturbosina (C₉-C₁₆), con 6.84 % de rendimiento. No obstante, la pirólisis conlleva un alto consumo energético y, como consecuencia, una producción costosa, debido al bajo porcentaje de aceite extraíble. Además, se pueden considerar combinaciones de cultivos como en el trabajo de [24], donde se reporta una conversión del 87 %. También pueden procesarse lípidos de organismos como insectos, microalgas de efluentes residuales o microbios, cuyo aceite generado a partir de sus bioprocesos incrementa la disponibilidad de triglicéridos renovables diferentes a materias agrícolas. En este sentido, sobresale el tratamiento biológico de los residuos orgánicos mediante la cría de insectos [12].

Materias primas de grasas de insectos

Las granjas de entomocultivo han captado interés debido al bajo requerimiento de tierra y agua para su desarrollo; asimismo, los insectos se alimentan con residuos alimenticios pre o posconsumo [25]. Aunque las especies *Tenebrio molitor* L., *Hermetia illucens* L. y *Musca domestica* L. han sido las más estudiadas como fuente de alimento para la agricultura, también son útiles para la producción de biocombustibles gracias a su contenido lipídico. En especial, las larvas de *Hermetia illucens* L. (LMSN, larva de mosca soldado negra) han recibido atención como materia prima para la producción de biocombustibles [26]. Dicha especie prospera en residuos orgánicos procesables para la generación de carbohidratos, lípidos y proteínas [12], [26], [27].


TABLA 3.

Rendimiento en la extracción de grasa por producción anual y tiempo de crecimiento. Adaptado de [5].

	CONTENIDO DE GRASA %	PRODUCCIÓN DE GRASA (L/HA/AÑO)	TIEMPO DE CRECIMIENTO
LMSN	30-40	193 560 600	22-24 días
Microalgas (30 % contenido de lípidos)	30	58 700	6-15 días
Ricino	50	1413	3-5 meses

Por otra parte, se recopilan en la Tabla 3 las alternativas potenciales para la extracción de triglicéridos en la producción de SAF [5]; cabe destacar que el aceite de la LMSN tiene en promedio un 15 % menos grasa que el de ricino. Además, la LMSN presenta la mayor (3219.84 veces) producción anual por hectárea en comparación con las otras materias primas listadas.

En la revisión de la literatura se ha utilizado el tratamiento biológico de extracción de lípidos para producir SAF a partir de la *Salicornia sp.* [12], [28]. Según el conocimiento de los autores, no se han encontrado otros estudios relacionados con la producción de SAF a partir de aceites de insectos utilizando el mismo método. Empero, la LMSN es una alternativa promisoriosa para la generación de bioturbosina, debido a su elevada producción por hectárea.

En los últimos 30 años se ha analizado la LMSN por su potencial de reducir cantidades ingentes de materia orgánica. La mosca soldado negra no representa una plaga y habita regiones templadas, cálidas, tropicales y subtropicales [25], [30]. Su alimentación convencional es la dieta Gainesville, equilibrada y controlada para mantener artificialmente una colonia de LMSN, y compuesta por 50 % de trigo, 30 % de alfalfa y 20 % de maíz [25], [31], [32]. Los productos de la crianza de LMSN incluyen harinas con alto contenido proteínico, grasas para la producción de biodiésel y fertilizantes. Cabe resaltar que las larvas son ricas en lípidos tras la degradación de residuos [25], [29].

El ciclo de vida del insecto abarca cuatro etapas: huevecillo, larva, pupa y adulto. En la adultez, se reproduce poniendo los huevecillos en los hábitats de la colonia de larvas. La transformación de pupa a mosca se denomina proceso de *pupación* [29],



[30]. Se cría durante 2 a 4 semanas, dependiendo de factores como temperatura, iluminación, humedad y disponibilidad de alimentos. Para obtener el mayor beneficio de grasas del insecto es necesario separar las larvas de la materia orgánica antes de la pupación; hasta ese punto, se alimenta de la materia orgánica disponible [27], [31].

Por medio de la cría de LMSN se logran altos porcentajes de reducción de residuos. A modo de ejemplo, el volumen se reduce un 73 % en peso húmedo en el caso de los vegetales, y en 59 % para la industria cervecera [33]. Este insecto digiere el alimento en la etapa larval, convirtiendo los carbohidratos y grasas del residuo en

TABLA 4.

Condiciones de crecimiento, reducción del residuo y extracción de LMSN en diferentes sustratos reportados.

MATERIA PRIMA	T (°C)	HR (%)	CRECIMIENTO PREPUPAL (DÍAS)	REDUCCIÓN DEL SUSTRATO (%)	ÍNDICE DE REDUCCIÓN DEL SUSTRATO (G/KG)	LÍPIDOS SATURADOS (%)	LÍPIDOS INSATURADOS (%)	RENDIMIENTO DE LÍPIDOS (%)	REFERENCIA
Suero de queso	32	70	11	-	2.73	63.82	36.18	42.48	[36]
Granos gastados de cerveza	27	60 - 70	18	66	-	67.30	32.70	12.8 base húmeda	[37]
Residuos de tomate	27	60 - 70	18	59	-	42.50	56.80	11.5 base húmeda	[37]
Residuos de fruta	27	70	16	70.8	3.2	81.88	18.12	40.70	[38]
Residuos de restaurante	27	65	18	-	-	78.29	21.42	38.60	[39]
Mezcla de residuos de frutas, vegetales, panadería y cerveceros	27	70	10	67.76	-	-	-	35.99	[40]
Residuos cerveceros	27	70	8	42.50	5.3	61.25	38.76	29.87	[38]
Residuos cerveceros	28	60	16	44.70	-	-	-	27.20	[41]
Granos gastados de cerveza	27	70	16	-	-	69.89	30.49	24.85	[42]
Granos de cerveza	25	60	22	-	3.01	-	-	23.20	[43]



grasa corporal a través de su rápido metabolismo [27], [34]. Al respecto, se ha reportado que el porcentaje de grasa de este insecto oscila entre 30 y 40 % [34], [35]. En la Tabla 4 se muestran condiciones de crecimiento de LMSN en diferentes sustratos experimentales, así como la disminución del residuo y los rendimientos de aceite en peso seco.

Al analizar la Tabla 4, se observa que los mayores rendimientos lipídicos en los sustratos experimentales surgen de residuos frutales [38] y lignocelulósicos (pan y bagazo de malta) [40]. Por otro lado, los sustratos cerveceros rinden entre el 23 y 30 % de lípidos, teniendo [38] el rendimiento más alto en peso seco. De los datos reportados, los aceites saturados predominan (entre 60 y 80 %) sobre los insaturados (del 20 al 40 %) para los residuos de frutas y malta gastada. Asimismo, el perfil de ácidos grasos varía entre cada sustrato; no obstante, los ácidos grasos con mayor presencia son el láurico (C12:0) y el palmítico (C16:0), tanto para los sustratos de residuos de frutas como los granos gastados de cerveza [36], [37], [39]. En particular, respecto a los compuestos reportados en granos gastados de cerveza, además de los químicos ya mencionados se detecta ácido oleico (C18:1), linoleico (C18:2) y omega 9 (C18:1 n9), los cuales también varían entre sustratos y pretratamientos [37], [38], [42].

Por otra parte, el modelo experimental de [36] consistió en reemplazar el 70 % de agua por suero de queso en la dieta Gainesville. El alto valor nutricional del suero facilitó la conversión del sustrato en lípidos almacenados por la LMSN. Aunado a esto, se reportó una variable en las condiciones de cría (32 °C) que modificó el tiempo de crecimiento y rendimiento de lípidos en ese sustrato experimental (Tabla 4). En paralelo con la misma línea de variación térmica, el tiempo de crecimiento a la etapa prepupal fue mayor en [43], donde se observó el peor aprovechamiento lipídico larval en conjunto con una baja humedad. También se ha reportado el crecimiento de LMSN en diferentes temperaturas (de 30 a 90 °C) por tiempos determinados con resultados favorables en las macromoléculas de proteínas y lípidos [32].

Perspectivas

Como ya se ha establecido, la ruta más breve para producir bioturbosina a partir de triglicéridos es el hidropocesamiento, donde la materia prima puede representar hasta el 90 % del costo total de producción. Por tanto, se ha incentivado la búsqueda de nuevas materias primas residuales; destacan los aceites de cocina, cuyo costo es menor comparado con la extracción de aceites de cultivos no co-



mestibles. Otra materia prima residual que se ha considerado en la obtención de SAF es aquella que contiene grasa de animales; asimismo, se ha reportado el uso de desechos provenientes de cultivos lignocelulósicos. No obstante, dado el bajo porcentaje de lípidos en la composición química de dicha fuente, es necesario someterla a un proceso de pirólisis que requiere un elevado consumo energético. En síntesis, la producción de SAF se puede ver limitada por la disponibilidad de aceites y grasas remanentes.

Aunque los insectos ocupan un nicho esencial en los ecosistemas, específicamente en la reducción de residuos orgánicos transformables en grasas, proteínas y otros nutrientes, se estima que más de la mitad de especies que existen en el planeta no han sido descubiertas [44]. La comunidad científica se ha enfocado en aquellas con capacidad de almacenar considerables porcentajes de lípidos y reducir materia orgánica. En tal contexto, hay varios aspectos que determinan la crianza a nivel industrial: la factibilidad de mantener colonias de huevecillos, el conocimiento de condiciones ambientales óptimas para su crecimiento en cautiverio, el ciclo de vida del insecto, el control de calidad, así como los sistemas de limpieza y prevención de enfermedades [44]. Al momento, solo se ha reportado el uso del aceite de la LMSN para la producción de biodiésel [44].

Un área de oportunidad es la producción de hidrocarburos renovables a partir del aceite de la LMSN. Dentro de estos hidrocarburos se pueden mencionar las gasolinas, el diésel verde y, por supuesto, el SAF, cuya demanda ha sufrido un incremento considerable. Dada la abundancia de materiales lignocelulósicos, su tratamiento biológico posibilita obtener grasas útiles para producir hidrocarburos menos agresivos con el ambiente. En su mayoría, la lignocelulosa está disponible en todos los países y pueden establecerse cadenas locales de suministro de biocombustibles, siempre y cuando se impulse la crianza a nivel industrial de insectos que la procesen [44].

Conclusiones

El sector de la aviación está buscando alternativas que satisfagan la demanda global de SAF a corto plazo para reducir las emisiones contaminantes. Pese a ello, el SAF aún no es económicamente competitivo frente a la turbosina fósil debido al alto costo y la baja disponibilidad de las materias primas, como aceites y grasas. En este sentido, se ha explorado el uso de aceites y grasas residuales, ya que su costo es menor, mas la disponibilidad permanece limitada. En contraste, los residuos lignocelulósicos son una fuente más abundante, aunque menos rica en aceites. Una opción para aprovecharlos es someterlos a tratamientos biológicos, utilizán-



dolos como dietas para microorganismos e insectos. La LMSN en particular puede generar un importante contenido de lípidos al mismo tiempo que degrada los residuos. Este enfoque abre una brecha en la investigación para diversificar las fuentes de lípidos y promover la producción sostenible de SAF, reduciendo la dependencia de los recursos no renovables.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Grupo Procesos Sustentables de Producción de Bioproductos de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como a la Facultad de Ingeniería misma casa de estudios por las becas de manutención y colegiaturas, respectivamente, otorgadas a J. J. Reséndiz Luna.

Referencias

- [1] International Energy Agency, "Executive summary-World Energy Outlook 2022 - Analysis", IEA. Paris, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022?language=es>.
- [2] International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022", *World Energy Outlook 2022*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
- [3] IATA- Sustainability and Economics, "IATA Global Outlook for Air Transport Industry Statistics Fact Sheet", 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/industry-statistics/>.
- [4] J. Yang, Z. Xin, Q. He, K. Corscadden y H. Niu, "An overview on performance characteristics of bio-jet fuels", *Fuel*, vol. 237, pp. 916-936, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.079
- [5] C. Gutiérrez Antonio, A. G. Romero Izquierdo, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, *Production Processes of Renewable Aviation Fuel*. Elsevier, 2021.
- [6] N. Yilmaz y A. Atmanli, "Sustainable alternative fuels in aviation", *Energy*, vol. 140, pp. 1378-1386, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.077
- [7] CAAFI, "CAAFI - Focus Area - Fuel Qualification", Fuel Qualification, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.caafi.org/fuel-qualifications>.
- [8] H. Wei, W. Liu, X. Chen, Q. Yang, J. Li y H. Chen, "Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review", *Fuel*, vol. 254, art. 115599, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.06.007
- [9] A. R. De Toni, L. R. Cancino, A. A. M. Oliveira, E. Oliveira y M. I. Rocha, "Conventional and alternative aviation fuels: An overview on composition, properties and aircraft engine test", *15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, pp. 1-8, 2014.
- [10] A. L. Moreno Gómez, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Modelling, simulation and intensification of the hydroprocessing of chicken fat to produce renewable aviation fuel", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 159, art. 108250, 2021, doi: 10.1016/j.cep.2020.108250
- [11] P. Mäki Arvela, M. Martínez Klimov y D. Y. Murzin, "Hydroconversion of fatty acids and vegetable oils for production of jet fuels", *Fuel*, vol. 306, art. 121673, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121673.
- [12] F. I. Gómez Castro, C. Gutiérrez Antonio, A. G. Romero Izquierdo, M. M. May Vázquez y S. Hernández, "Intensified technologies for the production of triglyceride-based biofuels: Current status and future trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 184, art. 113580, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113580
- [13] A. L. Moreno Gómez, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Production of Biojet Fuel from Waste Raw Materials", *Process Systems Engineering of Biofuels Development*, pp. 149-171, 2020, doi: 10.1002/9781119582694.ch6
- [14] C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro, J. A. de Lira Flores y S. Hernández, "A review on the production processes of renewable jet fuel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 709-729, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.108
- [15] M. T. Carrasco Suárez, A. G. Romero Izquierdo, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Production of renewable aviation fuel by waste cooking oil processing in a biorefinery scheme: Intensification of the purification zone", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 181, art. 109103, 2022, doi: 10.1016/j.cep.2022.109103



- [16] P. Muanruksa, J. Winterburn y P. Kaewkanetra, "Biojet fuel Production from Waste of Palm Oil Mill Effluent through Enzymatic Hydrolysis and Decarboxylation", *Catalysts*, vol. 11, núm. 1, pp. 1-10, 2021, doi: 10.3390/catal11010078
- [17] Y. K. Chen, C. H. Lin y W. C. Wang, "The conversion of biomass into renewable jet fuel", *Energy*, vol. 201, art. 117655, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117655
- [18] M. Li *et al.*, "A novel catalyst with variable active sites for the direct hydrogenation of waste oils into jet fuel", *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 260, art. 118114, 2020, doi: 10.1016/j.apcatb.2019.118114
- [19] X. Zhang *et al.*, "One-step preparation of biological aviation kerosene by catalytic hydrogenation of waste lard over Pt/SAPO-11", en *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 93, núm. 1, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/93/1/012003/pdf>.
- [20] X. Zhao, L. Wei, J. Julson, Q. Qiao, A. Dubey y G. Anderson, "Catalytic cracking of non-edible sunflower oil over zsm-5 for hydrocarbon bio-jet fuel", *New Biotechnology*, vol. 32, núm. 2, pp. 300-312, 2015, doi: 10.1016/j.nbt.2015.01.004
- [21] T. G. dos S. Souza, B. L. P. Santos, A. M. A. Santos, A. M. G. P. de Souza, J. Correia de Melo y A. Wisniewski, "Thermal and catalytic micropyrolysis for conversion of cottonseed oil dregs to produce biokerosene", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 129, pp. 21-28, 2018, doi: 10.1016/j.jaap.2017.12.010
- [22] A. G. Romero Izquierdo, C. Gutiérrez Antonio, F. I. Gómez Castro y S. Hernández, "Hydro-treating of Triglyceride Feedstock to Produce Renewable Aviation Fuel", *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*, vol. 11, núm. 2, pp. 77-89, doi: 10.2174/2405520411666180501110716
- [23] V. Verma, A. Mishra, M. Anand, S. A. Farooqui y A. K. Sinha, "Catalytic hydroprocessing of waste cooking oil for the production of drop-in aviation fuel and optimization for improving jet biofuel quality in a fixed bed reactor", *Fuel*, vol. 333, núm. 1, art. 126348, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126348
- [24] N. Vela García, D. Bolonio, M. J. García Martínez, M. F. Ortega, D. Almeida Streitwieser y L. Canoira, "Biojet fuel production from oleaginous crop residues: thermo-economic, life cycle and flight performance analysis", *Energy Conversion and Management*, vol. 244, art. 114534, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114534
- [25] M. Meneguz, L. Gasco y J. K. Tomberlin, "Impact of pH and feeding system on BSF larval development", *PLOS One*, vol. 13, núm. 8, pp. 1-15, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0202591
- [26] V. Caltzontzin Rabell, C. Gutiérrez Antonio, J. F. García Trejo y A. Feregrino Pérez, "Effect of whey addition on the growth and proximal composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae", en *XVII Congreso Internacional de Ingeniería*, pp. 1-6, 2022.
- [27] D. Bruno *et al.*, "An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*", *Arthropod Structure and Development*, vol. 58, art. 100969, 2020, doi: 10.1016/j.asd.2020.100969
- [28] M. Fredsgaard, L. S. S. Hulkko, T. Chaturvedi y M. H. Thomsen, "Process simulation and techno-economic assessment of *Salicornia* sp. based jet fuel refinery through *Hermetia illucens* sugars-to-lipids conversion and HEFA route", *Biomass and Bioenergy*, vol. 150, art. 106142, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106142
- [29] W. Feng *et al.*, "Polymer functionalization of biochar-based heterogeneous catalyst with acid-base bifunctional catalytic activity for conversion of the insect lipid into biodiesel", *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 16, núm. 7, art. 104814, 2023, doi: 10.1016/j.arabj-c.2023.104814
- [30] Q. Li, L. Zheng, N. Qiu, H. Cai, J. K. Tomberlin y Z. Yu, "Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (*Diptera: Stratiomyidae*) for biodiesel and sugar production", *Waste Management*, vol. 31, núm. 6, pp. 1316-1320, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.01.005
- [31] D. Purkayastha y S. Sarkar, "Sustainable waste management using black soldier fly larva: a review", *International Journal of Environmental, Science and Technology*, vol. 19, núm. 12, 2021, doi: 10.1007/s13762-021-03524-7
- [32] C. S. Liew *et al.*, "Low-temperature thermal pre-treated sewage sludge for feeding of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae: Protein, lipid and biodiesel profile and characterization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 178, 2022, art. 113241, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113241
- [33] M. V. Oviedo, J. F. García y C. Gutierrez, "Mosca soldado negra: eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos", *Ciencia*, vol. 73, pp. 52-59, 2022, [En línea]. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/73_3/PDF/09_73_3_1304.pdf.
- [34] S. Jung *et al.*, "Biodiesel production from black soldier fly larvae derived from food waste by non-catalytic transesterification", *Energy*, vol. 238, art. 121700, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121700
- [35] E. K. Sitepu *et al.*, "Controlled crushing device-intensified direct biodiesel production of Black Soldier Fly larvae", *Heliyon*, vol. 9, núm. 6, art. e16402, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16402
- [36] V. Caltzontzin Rabell, A. Escobar Ortiz, C. Gutiérrez Antonio, A. A. Feregrino Pérez y J. F. García Trejo, "Reevaluation process of cheese whey through the cultivation of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)", *Engineering Reports*, pp. 1-12, 2024, doi: 10.1002/eng2.12853
- [37] J. Hadj Saadoun *et al.*, "Lipid profile and growth of black soldier flies (*Hermetia illucens*, *Stratiomyidae*) reared on by-products from different food chains", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 100, núm. 9, 2020, doi: 10.1002/jsfa.10397



- [38] M. Meneguz *et al.*, "Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 98, núm. 15, 2018, doi: 10.1002/jsfa.9127
- [39] T. Sprangers *et al.*, "Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, núm. 97, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27734508/>.
- [40] G. Arabzadeh *et al.*, "Diet Composition Influences growth Performance, Bioconversion of Black Soldier Fly Larvae: Agronomic Value and In Vitro Biofungicidal Activity of Derived Frass", *Agronomy*, vol. 12, núm. 8, 2022, doi: 10.3390/agronomy12081765
- [41] E. M. Nyakeri, H. J. O. Ogola, M. A. Ayieko y F. A. Amimo, "Valorisation of organic waste material: growth performance of wild black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on different organic wastes", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 3, núm. 3, pp. 193-202, 2017, doi: 10.3920/JIFF2017.0004
- [42] C. Ceccotti *et al.*, "New value from food and industrial wastes - Bioaccumulation of omega-3 fatty acids from an oleaginous microbial biomass paired with a brewery by-product using black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae", *Waste Management*, vol. 143, pp. 95-104, 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.02.029
- [43] L. Bava *et al.*, "Rearing of *Hermetia Illucens* on Different organic by-products: Influence on Growth, Waste Reduction, and Environmental impact", *Animals*, vol. 9, núm. 6, 2019, doi: 10.3390/ani9060289
- [44] F. Manzano Agugliaro, M. J. Sanchez Muros, F. G. Barroso, A. Martínez Sánchez, S. Rojo y C. Pérez Bañón, "Insects for biodiesel production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, núm. 6, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.03.017



EVALUACIÓN MECÁNICA Y MORFOLÓGICA DE FIBRAS CAPILARES POLIMÉRICAS OBTENIDAS DE DIALIZADORES COMERCIALES

Mechanical and morphological analysis of polymeric hollow fibers
obtained from commercial dialyzers

Edgar Daniel Guzmán Sagaz^{1,2}
Julio Alejandro Rodríguez González^{1*}
Eduardo José Trujillo¹
Omero Nicolás Olalde Mendoza¹
Jorge Alberto Soto Cajiga¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,
Querétaro, México.

² Universidad Tecnológica de Querétaro,
Querétaro, México

*julio.rodriguez@cidesi.edu.mx

04



Resumen

Las membranas de los filtros de hemodiálisis son componentes esenciales para la eliminación de toxinas urémicas en tratamientos sanguíneos; sin embargo, la información disponible acerca de sus características mecánicas y morfológicas es escasa. El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis morfológico de membranas a base de fibras capilares poliméricas obtenidas de dos filtros hemodializadores comerciales y comparar su desempeño mecánico. La morfología se examinó usando microscopía óptica y electrónica de barrido; la evaluación mecánica mediante ensayos de tensión. Los resultados ópticos revelaron que las fibras capilares a lo largo de los filtros dia-

lizadores presentan una distribución relativamente uniforme, son huecas y poseen una forma ondulada y rizada. Los diámetros internos de las fibras oscilan entre 160 y 200 μm , mientras que el espesor de pared entre 30 y 40 μm ; ambas medidas coinciden con los valores típicos para esta clase de fibras. Las pruebas de tensión evidenciaron un mejor desempeño mecánico en fibras de polietersulfona respecto a las de polisulfona; tal característica podría implicar un mayor tiempo de vida de los filtros de polietersulfona, abriendo la posibilidad a una gama más amplia de aplicaciones.

Palabras clave: análisis morfológico, enfermedad renal, filtro de hemodiálisis, hemodiálisis, membrana de fibra capilar, polietersulfona, polisulfona.

Abstract

Hemodialysis filter membranes are essential components for the removal of uremic toxins in blood treatments; however, the available information on their mechanical and morphological characteristics is scarce. The objective of this work is to perform a morphological analysis of polymeric capillary fiber-based membranes obtained from two commercial hemodialyzer filters and to compare their mechanical performance. The morphology was examined using an optical microscope and a scanning electron one; the mechanical evaluation, by tensile tests. The optical results showed that the capillary

fibers along the dialysis filters are relatively well distributed, hollow, and possess a wavy and curly shape. The internal diameters of the fibers range between 160 and 200 μm , while the wall thickness between 30 and 40 μm ; both measurements are consistent with typical values for this class of fibers. Tensile tests evidenced a better mechanical performance in polyethersulfone fibers with respect to polysulfone fibers; such a characteristic could imply a longer lifetime of polyethersulfone filters, opening the possibility to a wider range of applications.

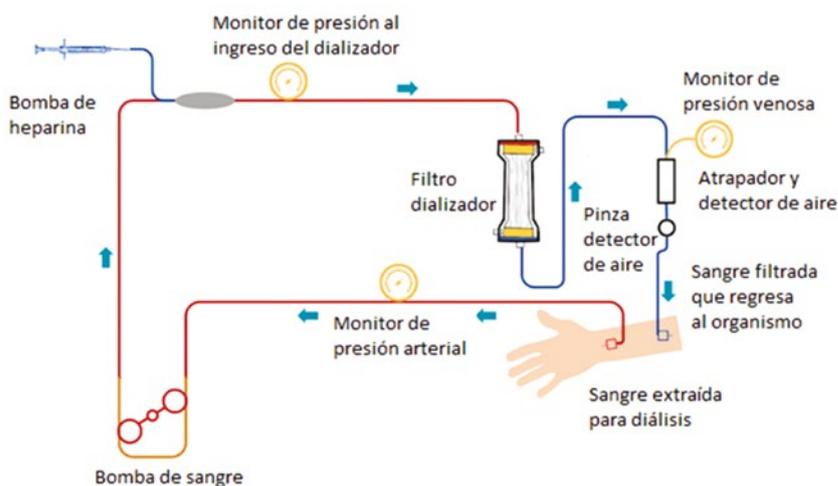
Keywords: morphological analysis, kidney disease, hemodialysis filter, hemodialysis, capillary fiber membrane, polyethersulfone, polysulfone.



Introducción

La enfermedad renal crónica es catalogada como una enfermedad debilitante donde los afectados carecen de la capacidad para eliminar toxinas del organismo [1]. Las personas con este padecimiento cuentan con tres opciones de tratamiento: hemodiálisis, diálisis peritoneal y trasplante renal [2]. El proceso de hemodiálisis comienza por extraer sangre del paciente por el extremo arterial de un dializador; la sangre fluye por el interior de una membrana de fibras huecas y sale por el extremo venoso del mismo, ingresando nuevamente al usuario como se observa en la Figura 1. Al mismo tiempo, se bombea líquido dializador en sentido contrario al flujo sanguíneo para así arrastrar las toxinas urémicas contenidas en la sangre. El intercambio de solutos se lleva a cabo mediante transporte por difusión y/o convección.

FIGURA 1.
Diagrama del proceso de hemodiálisis.
Fuente: elaboración propia.



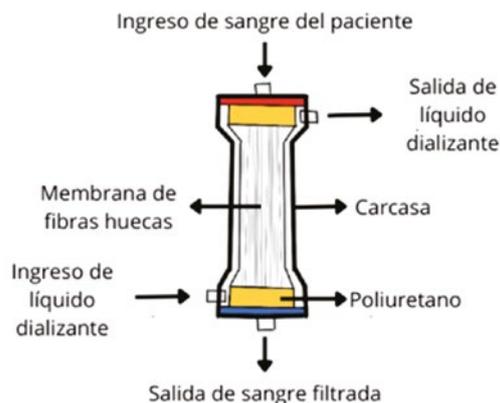
Hay cinco tipos de hemodializadores en función de cuánta microglobulina beta 2 (β_2 -M) remueven y cuánta albúmina (ALB) se pierde en una sesión de cuatro horas de tratamiento: bajo flujo, alto flujo, *cut-off* (punto de corte), fuga de proteínas y superalto flujo. El de bajo flujo es el que remueve menos β_2 -M y pierde menor cantidad de albúmina, mientras el de superalto flujo logra eliminar la mayor cantidad de β_2 -M y presenta una alta pérdida de albúmina [3]. Como se observa en la Figura 2, los dializadores de sangre cuentan con una membrana de fibras huecas cubierta por una carcasa de polipropileno o policarbonato encapsulada por los extremos con poliuretano; asimismo, disponen de dos conectores en cada extremo para el ingreso y egreso de dializante y sangre. Las membranas de fibra hueca se dividen en celulósicas y sintéticas; como el nombre lo indica, las primeras se basan en materiales de celulosa natural y las segundas en polímeros artificiales, como la polisulfona (PSU), la polietersulfona (PES), el polimetilmetacrilato (PMMA) y el fluoruro de polivinilideno (PVDF) [3].



FIGURA 2.

Esquema de un dializador y sus partes.

Fuente: elaboración propia.



Las fibras huecas están diseñadas para filtrar la sangre y eliminar las toxinas urémicas, clasificadas según la masa atómica de sus moléculas, medida en daltons: pequeñas unidas a proteínas (<0.5 kDa), pequeñas (0.5 kDa), pequeñas-medianas (0.5-15 kDa), medianas (>15-25 kDa), medianas-grandes (>25-58 kDa) y grandes (>58-170 kDa) [4]. Se han presentado diversos estudios acerca de estos materiales; por ejemplo, Sudhir K. Bowry y Charles Chazot [5] reportaron aspectos característicos de las membranas y su funcionamiento. En 2010, Wang *et al.* [6] desarrollaron fibras huecas porosas para aplicaciones de ósmosis directa, cuya elevada porosidad, distribución de poros homogénea y fuerte resistencia mecánica superan las membranas comerciales. En otro estudio, Noor *et al.* [7] manufacturaron fibras poliméricas a partir de polietersulfona adicionada con etilenglicol y encontraron que son más eficientes en términos de permeabilidad respecto de las fibras sin aditivos, debido al cambio en su estructura morfológica. En tiempo reciente, Wojciechowski *et al.* [8] metanalizaron trabajos sobre métodos de fabricación de fibras huecas poliméricas considerando factores biomédicos, biotecnológicos y ambientales: entre los materiales predominantes están la polisulfona, la polietersulfona, el poliuretano y el acetato de celulosa. Los autores afirman que las propiedades mecánicas y de transporte/separación de masa, además de las estructurales pueden estar influenciadas por la temperatura, la humedad y cómo se compone la solución en el baño de coagulación durante la manufactura. Por otro lado, se han reportado indagaciones donde se analizan las propiedades físicas y químicas de membranas de diferentes materiales sintéticos [9], [10], [11], cuyos resultados han propiciado mejoras en los filtros dializadores en términos de eficiencia y biocompatibilidad. Sin embargo, pese a la importancia de las fibras poliméricas comerciales para los tratamientos médicos de hemodiálisis y diálisis, los estudios de su morfología y comportamiento mecánico son escasos. En consecuencia, urge examinarlas para entender su posible efecto ante condiciones de operación real. Además, el estudio del comportamiento bajo tensión de las fibras es crítico para el diseño estructural de las membranas. En ese sentido, en la presente se propone



evaluar y comparar las fibras poliméricas de dos hemodializadores con el fin de dilucidar la influencia de sus características en su desempeño.

Respecto al diámetro interno de las fibras capilares y su relación con la eficiencia en la hemodiálisis, la literatura sugiere que la reducción de dicho valor a menos de 200 μm mejora la depuración de moléculas grandes y aumenta el volumen convectivo [12]. No obstante, disminuciones a diámetros de 150 μm podrían causar una caída de presión interna superior a 150 mmHg y arriesgar la seguridad del paciente [13]. Por otro lado, investigaciones recientes [14] reportan que el diámetro interno de las fibras capilares no parece ser un factor que influya notablemente en la eficiencia de la eliminación de solutos durante la hemodiálisis.

Materiales y métodos

Proceso de obtención de fibras

Las muestras se obtuvieron de dos dializadores de sangre comerciales: el tipo PES, de polietersulfona (Figura 3), y el tipo PSU, de polisulfona (Figura 4). Se extrajeron empleando una cortadora DREMEL 3000 y un disco de diamante de 1 ½" meticulosamente desinfectado; se ejecutaron cortes de precisión transversales en la sección del poliuretano visible a través de la carcasa y de las tapas de rosca para liberar las fibras del extremo del filtro. De igual forma, se extrajo una rebanada de la porción de las fibras encapsuladas con poliuretano. Cabe señalar que, por motivos de confidencialidad, los nombres de las marcas de los filtros no serán revelados, aunque se destaca que el origen de ambos es alemán.

FIGURA 3.

Fórmula química de la PES.
Elaboración propia.

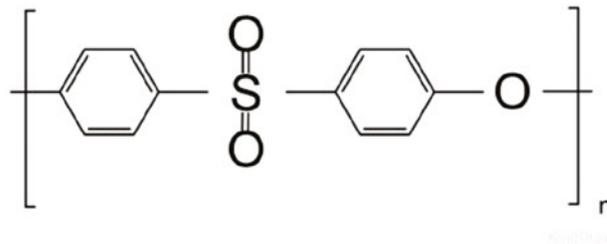
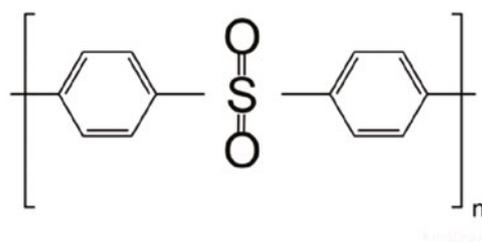


FIGURA 4.

Fórmula química de la PSU.
Elaboración propia.





Microscopía óptica y electrónica

La morfología de las fibras fue evaluada mediante microscopías óptica y electrónica de barrido. Se empleó un microscopio óptico de la marca Leica, modelo ZOOM 2000, al cual se le incorporó una cámara Axioma modelo 305 color. Las imágenes de la sección del poliuretano y de las fibras se obtuvieron a una escala de 30x. También fue empleado un microscopio electrónico marca JEOL, modelo JSM-6610LV. Se examinó la sección del poliuretano y la sección transversal de las fibras, ambas muestras fueron recubiertas con oro, ya que no son materiales electroconductores. Para analizar la sección transversal de las fibras poliméricas individuales, se sumergieron a un baño criogénico de nitrógeno líquido, posteriormente se fracturaron aplicando una fuerza mecánica sin modificar la geometría de las muestras para obtener especímenes analizables [6].

Ensayo mecánico de tensión

Se evaluaron las propiedades mecánicas bajo tensión de las fibras a través de una máquina universal MTS Insight Electromechanical, estableciendo una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min y una celda de carga calibrada de 400 N. Las muestras, de 20 cm de longitud, fueron ensayadas a 20 °C y humedad relativa del 52 %, sujetadas por los extremos con mordazas, dejando una separación de 10 cm entre cada mordaza.

Obtenidos los resultados de las pruebas, se calculó el esfuerzo a la tensión con la Ecuación 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

σ representa el esfuerzo bajo tensión.

F es la fuerza (N).

A es el área transversal de la fibra hueca (m²), gobernada por la Ecuación 2.

$$A = \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_i^2) \quad (2)$$

Donde:

d_0 es el diámetro externo de la fibra hueca.

d_i es el diámetro interno.

A su vez, la deformación se calculó empleando la Ecuación 3:



$$\varepsilon = \frac{(L_f - L_i)}{L_i} \quad (3)$$

Donde:

ε es la deformación unitaria.

L_f la longitud final.

L_i la longitud inicial.

El módulo de Young (E) equivale a la relación entre el esfuerzo y la deformación aplicada (Ecuación 4):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Donde:

σ es el esfuerzo.

ε la deformación unitaria.

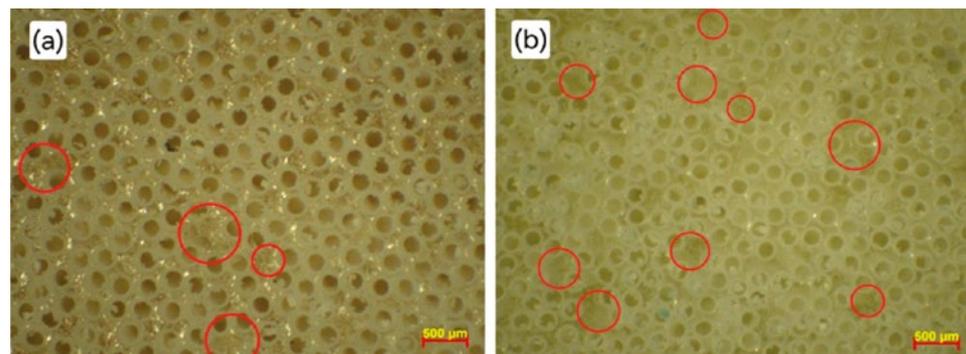
Resultados y discusión

Análisis morfológico

Con el fin de conocer la distribución de las fibras capilares en el extremo de los dializadores, así como la separación entre ellas, se capturaron imágenes ópticas de la superficie de esa zona (Figura 5). En la Figura 5a se presenta el dializador tipo PES y en la Figura 5b el tipo PSU, ambas de la sección transversal de los extremos de los dispositivos. En 5b se aprecia una mayor cantidad de zonas sin fibras huecas poliméricas en comparación con 5a (señaladas con círculos rojos); es decir, hay mayor concentración de fibras por área y mejor distribución en el extremo del elemento tipo PES. Con certeza, el contraste se debe a la diferencia entre la cantidad de fibras capilares en cada uno de los filtros.

FIGURA 5.

Imágenes ópticas de la región extrema de los filtros dializadores:
(a) dializador tipo PES
(b) dializador tipo PSU

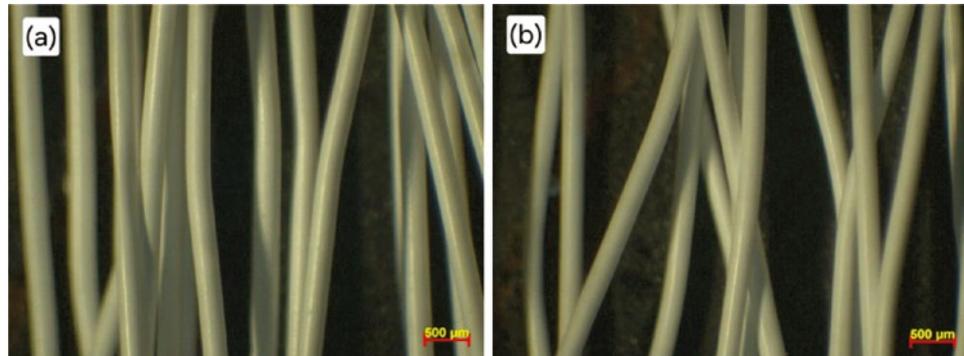




En la Figura 6 se muestran imágenes ópticas de un conjunto de fibras capilares obtenidas de dializadores tipo PSE (Figura 6a) y tipo PSU (Figura 6b). Ambas categorías presentan una coloración amarillenta debido a la luz empleada para observar las imágenes con el microscopio. En cuanto a su morfología superficial, ambas fibras son lisas y de forma hueca.

FIGURA 6.

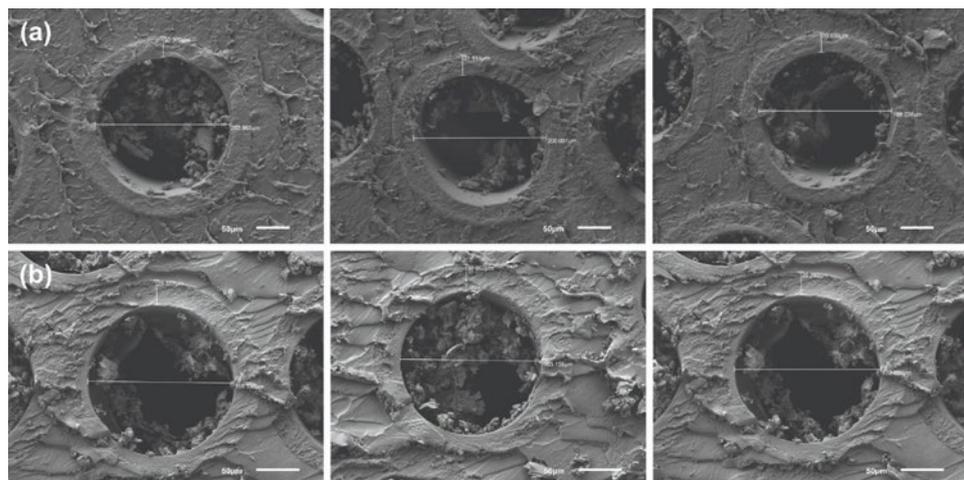
Imágenes ópticas longitudinales de un conjunto de fibras capilares de los filtros:
(a) tipo PES
(b) tipo PSU



En la Figura 7 se presentan micrografías MEB de los extremos de los dializadores A y B, acotadas con sus correspondientes diámetros internos. La medición del diámetro interno promedio de tres muestras fue de 200.74 μm para el dializador tipo A y de 168.21 μm para el dispositivo tipo B; para el espesor, se computaron promedios de 30.37 y 28.57 μm para los tipos A y B. Los resultados coincidieron con los reportados en las fichas técnicas de los hemodializadores, las cuales indican un diámetro interno de 200 μm para el tipo A y de 185 μm para el B. Además, respecto a los límites mencionados en la introducción, los diámetros internos de las fibras capilares observadas en este análisis respetan el rango para los procesos de hemodiálisis y son seguros para los pacientes.

FIGURA 7.

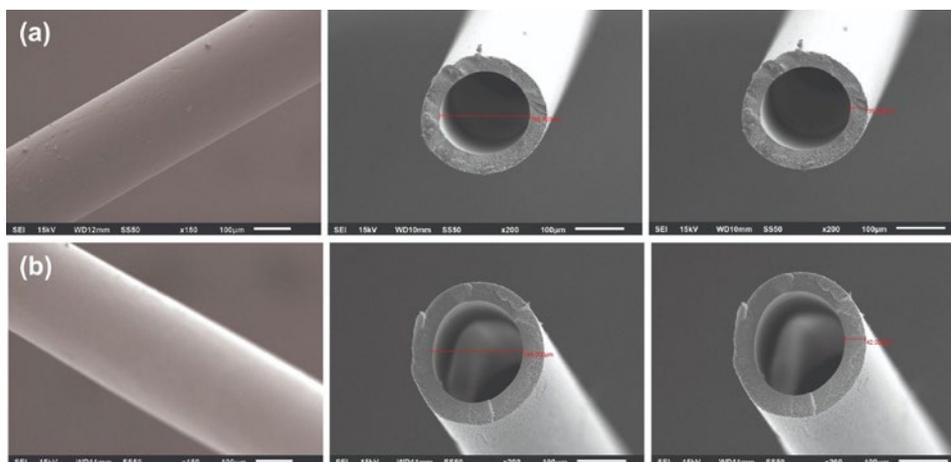
Imágenes MEB de las fibras capilares poliméricas de los filtros dializadores en la zona extrema recubierta de poliuretano:
(a) dializador tipo A
(b) tipo B





En la Figura 8 se muestran micrografías MEB de la sección transversal de las fibras capilares poliméricas obtenidas de los dializadores A (Figura 8a) y B (Figura 8b), se indica también el diámetro interno y el espesor de la pared fibrilar. En cuanto al espesor, las mediciones señalan que el dializador tipo A posee cerca de $35\ \mu\text{m}$, y el B alcanza $42\ \mu\text{m}$; ambos se aproximan a los valores de las fichas técnicas, de $40\ \mu\text{m}$ para el tipo A y $35\ \mu\text{m}$ para la clase B.

FIGURA 8.
Imágenes MEB de la sección transversal de fibras capilares poliméricas de los filtros dializadores:
(a) tipo A
(b) tipo B

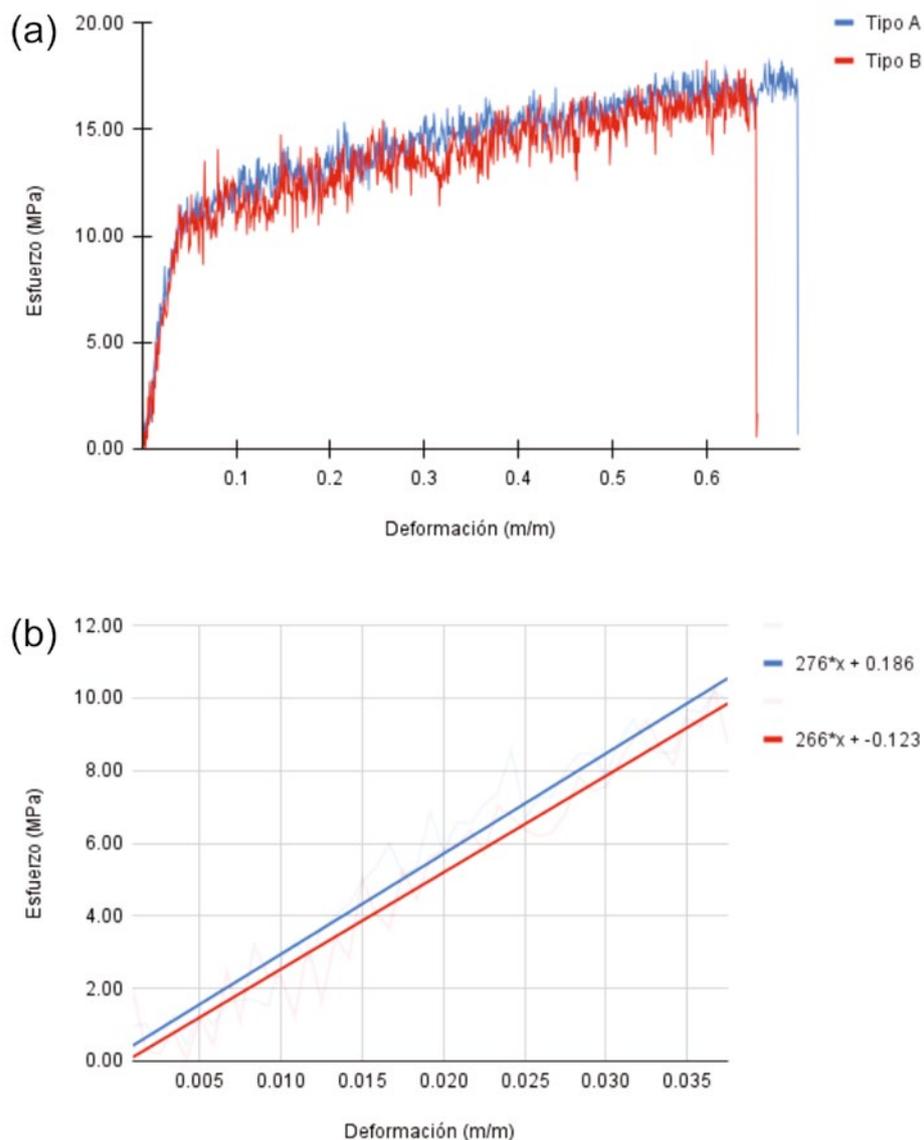


Evaluación mecánica

Se realizaron ensayos mecánicos bajo tensión a fibras individuales de ambos dializadores para determinar su capacidad para resistir los esfuerzos generados por el flujo de dializante. A tal efecto, se considera resistencia a la tensión como una medida directa (de la resistencia) a la presión interna de la fibra, como lo reporta Taselli *et al.* [15]. En este sentido, la Figura 9a presenta los resultados de las curvas representativas esfuerzo-deformación de las fibras de dializadores tipos A y B. Tal como se aprecia, las curvas exhiben el comportamiento elástico-plástico típico de materiales termoplásticos. Para valores pequeños de deformación se traza una región lineal; a deformaciones superiores al 0.05 % se entabla una relación donde el esfuerzo incrementa en función de la deformación hasta alcanzar el punto de ruptura. Al comparar las curvas se puede observar un desempeño mecánico a tensión ligeramente mejor para las fibras capilares del dializador tipo A respecto al tipo B (Figura 9b).


FIGURA 9.

(a) Gráfica de esfuerzo-deformación de las fibras capilares del dializador tipo A y tipo B.
 (b) Ajuste lineal para el cálculo del módulo de Young.



Los resultados de las pruebas mecánicas a tensión se muestran en la Tabla 1: módulo de Young, esfuerzo máximo, esfuerzo a la ruptura y deformación a la ruptura. Los datos presentados son los promedios de cinco muestras analizadas para cada tipo de dializador.

TABLA 1.

Resultados de la prueba de tensión realizada a las fibras poliméricas.

	MÓDULO DE YOUNG	ESFUERZO MÁXIMO	ESFUERZO A LA RUPTURA	DEFORMACIÓN A LA RUPTURA
Dializador	MPa	MPa	MPa	%
Tipo A (PES)	336 ± 41	20.60 ± 1.87	19.20 ± 1.81	69.32 ± 3.81
Tipo B (PSU)	286 ± 43	18.50 ± 0.89	18.70 ± 1.30	65.47 ± 1.24



De acuerdo con los valores de la Tabla 1, el dializador tipo A obtuvo un módulo elástico a la tensión de 336 MPa, contra los 286 MPa del filtro tipo B; en esencia, resiste mejor la tensión. Respecto al esfuerzo máximo, hubo una diferencia de 2.1 MPa, lo que reafirma la ventaja de A sobre B; en el cálculo del esfuerzo a la ruptura, la diferencia de 0.5 MPa indica que ambos fallan bajo un esfuerzo similar. En la última deformación antes de la ruptura se nota una diferencia de 3.85 % a favor de las fibras A.

Conclusiones

Cabe resaltar que otros autores, como Alasfar R. *et al.* [16], sintetizaron fibras huecas de polisulfona y calcularon un módulo de Young de 175.05 MPa y una deformación a la ruptura de aproximadamente 27.5 %. Por otro lado, en el trabajo realizado por Qin y Chung [17], se fabricaron membranas con polietersulfona y se reportó un esfuerzo a la ruptura en el rango de 2.84 MPa a 3.00 MPa, una deformación a la ruptura de 29.5 a 43.8 % y un módulo de Young entre 107.2 y 138.9 MPa. Sus resultados se encuentran muy por debajo de los valores obtenidos en este trabajo evaluando fibras de dializadores comerciales, lo cual podría deberse al control del proceso de manufactura de las membranas para los filtros comerciales.

Las mediciones realizadas con el microscopio óptico mostraron que las membranas de los filtros dializadores están bien distribuidas, las fibras son huecas y están en forma ondulada y rizada a lo largo del filtro. Los diámetros internos de las fibras adoptaron valores entre 160 y 200 μm , mientras que el espesor de pared osciló entre 30 y 40 μm , en concordancia con las cifras reportadas en la ficha técnica de ambos dializadores. Los resultados de los ensayos mecánicos de tensión a las membranas de fibras capilares poliméricas mostraron una curva esfuerzo-deformación típica de materiales termoplásticos con una rigidez, resistencia a la tensión y deformación a la ruptura mayor en fibras a base de polietersulfona con respecto a las fibras de polisulfona. Puede concluirse que las membranas compuestas de polímeros como la polietersulfona dan como efecto un mayor tiempo de vida después de usarse en los procesos de hemodiálisis, debido a que podrían ofrecer una mejor resistencia a los esfuerzos de tensión generados por el flujo de dializante y sangre.



Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), al Laboratorio Nacional Conahcyt de Investigación y Tecnologías Médicas (LANITEM) y al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) por su apoyo durante toda esta investigación. Edgar Sagaz agradece al CIDESI por el apoyo económico otorgado a lo largo de su estancia en la Institución. Por último, agradecemos a la Ing. Daysi López, M. en C. Edgar Miranda y M. en C. J. Antonio Banderas por su apoyo técnico brindado en este trabajo.

Referencias

- [1] X. Ying, S. Qiu, X. Ye, Z. Li, J. Zhou y Y. Wang, "Elution-free hollow-fiber membranes of block copolymers for hemodialysis balancing protein retaining and toxin clearance", *Journal of Membrane Science*, vol. 695, 2024, art. 122457 doi: 10.1016/j.memsci.2024.122457
- [2] A. K. Bello *et al.*, "A report by the International Society of Nephrology: An Assessment of Global Kidney Health Care Status focusing on Capacity, Availability, Accessibility, Affordability and Outcomes of Kidney Disease", *ISN-Global Kidney Health Atlas*, Bruselas, Bélgica, 2023.
- [3] N. Said, W. Lau, Y. Ho, S. Lim, M. N. Zainol Abidin y A. F. Ismail, "A Review of Commercial Developments and Recent Laboratory Research of Dialyzers and Membranes for Hemodialysis Application", *Membranes*, vol. 11, núm. 10, pp. 767, 2021, doi: 10.3390/membranes11100767
- [4] M. H. Rosner, *et al.*, "Classification of Uremic Toxins and Their Role in Kidney Failure", *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, vol. 16, núm. 12, 2021, doi: 10.2215/CJN.02660221
- [5] S. K. Bowry y C. Chazot, "The scientific principles and technological determinants of haemodialysis membranes", *Clinical Kidney Journal*, vol. 14, núm. 4, 2021, doi: 10.1093/cjk/sfab184
- [6] R. Wang, L. Shi, C. Y. Tang, S. Chou, C. Qiu y A. G. Fane, "Characterization of novel forward osmosis hollow fiber membranes", *Journal of Membrane Science*, vol. 355, núm. 1-2, pp. 158-167, 2010, doi: 10.1016/j.memsci.2010.03.017
- [7] N. Noor, J. Koll, N. Scharnagl, C. Abetz y V. Abetz, "Hollow Fiber Membranes of Blends of Polyethersulfone and Sulfonated Polymers", *Membranes*, vol. 8, núm. 3, pp. 54, 2018, doi: 10.3390/membranes8030054
- [8] C. Wojciechowski, M. Wasylęczko, D. Lewińska y A. Chwojnowski, "A Comprehensive Review of Hollow-Fiber Membrane Fabrication Methods across Biomedical, Biotechnological, and Environmental Domains", *Molecules*, vol. 29, núm. 11, pp. 2637, 2024, doi: 10.3390/molecules29112637
- [9] O. E. M. ter Beek, D. Pavlenko y D. Stamatialis, "Hollow fiber membranes for long-term hemodialysis based on polyethersulfone-SlipSkin™ polymer blends", *Journal of Membrane Science*, vol. 604, 2020, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118068
- [10] T. T. Nguyen, K. Jang, N. Her, C. Kim, S. Kim y I. S. Kim, "Fabrication of hollow fiber membranes with different inner diameters for enhanced uremic toxins removal in hemodialysis: Exploring from high-flux to high molecular weight retention onset classes", *Journal of Membrane Science*, vol. 663, 2022, doi: 10.1016/j.memsci.2022.121065
- [11] B. Ghofrani *et al.*, "Fabrication and characterization of novel PES-based nanocomposite hollow fiber membranes for the hemodialysis process", *Separation and Purification Technology*, vol. 317, art. 123939, 2023, doi: 10.1016/j.seppur.2023.123939
- [12] C. Ronco, A. Brendolan, A. Lupi, G. Metry y N. W. Levin, "Effects of a reduced inner diameter of hollow fibers in hemodialyzers", *Kidney International*, vol. 58, núm. 2, 2000, doi: 10.1046/j.1523-1755.2000.00230.x
- [13] M. Mineshima *et al.*, "Effects of internal filtration on the solute removal efficiency of a dialyzer", *ASAIO Journal*, vol. 46, pp. 456-60, 2000, doi: 10.1097/00002480-200007000-00018
- [14] F. Maduell *et al.*, "Valoración del diámetro interno del dializador en hemodiafiltración on-line", *Nefrología*, vol. 38, núm. 1, pp. 34-40, 2018, doi: 10.1016/j.nefro.2017.03.013
- [15] F. Tasselli, J. C. Jansen, F. Sidari y E. Drioli, "Morphology and transport property control of modified poly (ether ether ketone) (PEEKWC) hollow fiber membranes prepared from PEEKWC/PVP blends: influence of the relative humidity in the air gap", *Journal of Membrane Science*, vol. 255, núm. 1-2, pp. 13-22, 2005, doi: 10.1016/j.memsci.2005.01.014



- [16] R. H. Alasfar, V. Kochkodan, S. Ahzi, N. Barth y M. Koç, "Preparation and Characterization of Polysulfone Membranes Reinforced with Cellulose Nanofibers", *Polymers*, vol. 14, núm. 16, art. 3317, 2022, doi: 10.3390/polym14163317
- [17] J. Qin y T. Chung, "Effect of dope flow rate on the morphology, separation performance, thermal and mechanical properties of ultrafiltration hollow fibre membranes", *Journal of Membrane Science*, vol. 157, núm. 1, pp. 35-51, 1999, doi: 10.1016/S0376-7388(98)00361-5



TERAPIA FOTODINÁMICA Y APLICACIONES EN BIOMEDICINA

Photodynamic therapy and applications in biomedicine

Ricardo Lozano Rosas*
David Loaiza Toscuento
Elvis A. García Cortés
Doralycia Carranza Zuñiga
M. Gloria Conde Cuatzo
Teresita Spezzia Mazzocco

Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica, Puebla, México

*ricardo.lozano@inaoep.mx

05





Resumen

La resistencia a los antibióticos es una creciente preocupación en la salud pública global, ya que amenaza con devolvernos a una era donde las infecciones microbianas ordinarias podrían ser mortales. Entre las principales causas está el uso excesivo e inapropiado de antibióticos en medicina y agricultura. Pero hay una alternativa: la terapia fotodinámica (TFD), surgida de la fotofísica y la fotoquímica para tratar diversas enfermedades. Este manuscrito ofrece un panorama de la TFD, abarcando sus fundamentos científicos, mecanismos de acción y eficacia en el tratamiento de cáncer e infecciones bacterianas, fúngicas y virales. Además, se discuten los avances en el

desarrollo y uso de fotosensibilizadores (FS), y estrategias para mejorar su selectividad y eficacia terapéutica. La TFD combina un FS, luz y oxígeno para generar especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), que inducen daño celular. Su aplicación en oncología y dermatología, y su potencial en terapias antimicrobianas, muestran su versatilidad. Se resaltan los desafíos en dosimetría de luz y FS, y la investigación en mecánica celular por medio de pinzas ópticas y el desarrollo de FS a partir de nanopartículas. Estos desarrollos prometen terapias más efectivas y menos invasivas para el tratamiento de diversas enfermedades.

Palabras clave: biomedicina, dosimetría, nanotecnología, pinzas ópticas, speckle, terapia fotodinámica.

Abstract

Antibiotic resistance is a growing global public health concern, as it threatens to return us to an era where common microbial infections could be deadly. Among the main causes stand the overuse and inappropriate administration of antibiotics in medicine and agriculture. However, there is an alternative: photodynamic therapy (PDT), which has emerged using principles of photophysics and photochemistry to treat various diseases. This manuscript provides an overview of PDT, covering its scientific rationale, mechanisms of action, and its efficacy in the treatment of cancer, bacterial, fungal, and viral infections. In addition, advances in the

development and use of photosensitizers (PS) and strategies to improve selectivity and therapeutic efficacy are discussed. PDT combines a PS, light and oxygen to generate reactive oxygen species (ROS) that induce cell damage. Its application in oncology and dermatology, and its potential in antimicrobial therapies, show its versatility. Challenges in light dosimetry and PS are highlighted. Research in cell mechanics based on optical tweezers and the development of PS from nanoparticles are shown. Therefore these developments entail more effective and less invasive therapies for the treatment of various diseases.

Keywords: biomedicine, dosimetry, nanotechnology, optical tweezers, speckle, photodynamic therapy.



Introducción

En el campo de la biomedicina, la terapia fotodinámica (TFD) constituye una alternativa terapéutica innovadora basada en la fotofísica y la fotoquímica para el tratamiento de una amplia gama de patologías. Esta técnica combina tres elementos: un fotosensibilizador (FS), luz y oxígeno [1]. La luz ha sido utilizada para tratar enfermedades desde tiempos antiguos en civilizaciones como la egipcia, la india y la china, quienes la empleaban para tratar problemas de piel, cáncer, raquitismo e incluso enfermedades mentales [2]. Los griegos antiguos también recurrían a la exposición al sol como tratamiento para diversos padecimientos, y tomar baños de sol era una actividad común. En la Francia de los siglos XVIII y XIX, se utilizaba la luz solar para tratar condiciones como la tuberculosis, el raquitismo, el escorbuto, el reumatismo y la debilidad muscular. Sin embargo, su uso en medicina y cirugía en un nivel significativo es relativamente reciente. Desde finales del siglo XX, la luz se ha empleado en diversas formas, incluida la TFD, que muestra avances considerables en el tratamiento del cáncer, infecciones bacterianas, fúngicas e incluso virales [3].

En la agricultura moderna, los antibióticos y fungicidas se han convertido en una práctica común para prevenir y tratar infecciones en cultivos y garantizar altos rendimientos. Empero, la práctica ha generado preocupaciones debido al desarrollo de resistencia antimicrobiana, que afecta tanto a organismos patógenos como a la microbiota benéfica de los suelos y plantas [4]. Esta preocupación coloca a la TFD en una posición primordial debido a que soluciona directamente el problema de la resistencia antimicrobiana [5].

El presente manuscrito ofrece una visión integral de la TFD y sus aplicaciones en biomedicina, actuales y emergentes. Se abordan los fundamentos científicos y los mecanismos de acción de la TFD, junto con una revisión de la literatura que respalda su eficacia en el tratamiento de diversas enfermedades. Asimismo, se discuten los avances recientes en la investigación, incluyendo el desarrollo de nuevas formulaciones de FS y estrategias innovadoras para mejorar la selectividad y la eficacia terapéutica. A través de este análisis, se busca brindar una comprensión más clara y accesible de la TFD, destacando su potencial en el tratamiento médico. Además, se integran desarrollos específicos realizados por los autores en el laboratorio de terapia fotodinámica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Se trata de avances en la caracterización de levaduras resistentes, el uso de pinzas ópticas para analizar la mecánica celular y el diseño de FS basados en nanopartículas (NP). Este enfoque no solo conecta la literatura internacional con



aportaciones originales, sino que también pone de relieve el impacto de la investigación científica realizada en México.

Marco teórico

Los FS pueden verse al mismo tiempo como medios de transporte y traducción, ya que transfieren la energía de la luz hacia las células patógenas y en el proceso la transforman en energía química [6]. Existen varios tipos de FS, los primeros en usarse en TFD fueron los colorantes, posteriormente las porfirinas y recientemente se han diseñado a partir de NP [7]. Un segundo factor es la luz; dependiendo del FS, se requiere una longitud de onda específica. Es decir, cada emisión de luz está en una región determinada, y es importante elegirla correctamente, ya que es la encargada de “activar” el FS para que pase la energía hacia las células enfermas [8]. En último lugar, tenemos al oxígeno; esa molécula vital es también la causante de procesos oxidativos. A través de las especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) en conjunto con el oxígeno molecular, se genera un estrés oxidativo en las células patógenas, un desequilibrio químico que desencadena el proceso de muerte celular [9].

El proceso general de la TFD (Figura 1) comienza con la administración del FS, que se acumula selectivamente en el tejido afectado, ya sea mediante su propia afinidad con las células enfermas o mediante técnicas de direccionamiento específico [10]. Una vez que el FS se ha acumulado en concentraciones adecuadas, se administra luz de una longitud de onda específica sobre el área afectada. Cuando la luz incide sobre el FS, este absorbe fotones y entra en un estado excitado, que lo insta a interactuar con el oxígeno presente en el tejido. Esta interacción produce ROS y oxígeno molecular, que inducen daño celular [11]. La TFD utiliza FS que, al activarse con luz y oxígeno, dañan selectivamente tejidos tumorales o patógenos sin afectar células sanas. Esta selectividad se logra mediante la interacción de los FS con biomarcadores específicos o sistemas de administración específicamente dirigidos [12]. Los avances en nanotecnología han mejorado significativamente esta precisión mediante FS de segunda generación y sistemas basados en nanomateriales, que optimizan la acumulación en tejidos enfermos y reducen los efectos secundarios, consolidando a la TFD como una opción terapéutica innovadora y de alta especificidad [2].

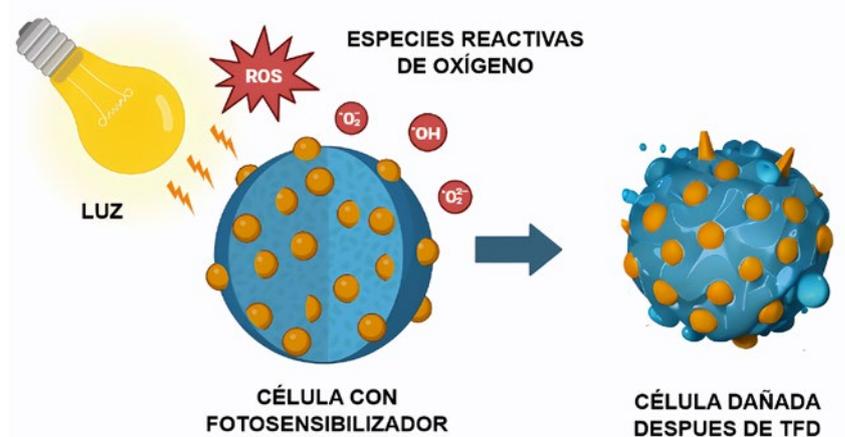
Las aplicaciones de la TFD en biomedicina son variadas y prometedoras. En oncología, se utiliza para tratar tumores superficiales y localizados, así como para aliviar síntomas en tumores avanzados. En dermatología, se emplea en el tratamiento de afecciones cutáneas como el acné, la queratosis actínica y el carcinoma



de células basales. Además, ha mostrado eficacia en el tratamiento de infecciones bacterianas, fúngicas y virales, así como en la terapia antimicrobiana y la desinfección de superficies [13].

La investigación continua en el campo de la TFD se centra en el desarrollo de nuevos FS con propiedades mejoradas de selectividad y eficacia terapéutica, así como en el refinamiento de las condiciones de tratamiento y la exploración de nuevas aplicaciones clínicas. En conjunto, la TFD representa una herramienta valiosa y versátil en el arsenal terapéutico de la biomedicina, con el potencial de mejorar significativamente el tratamiento de una amplia gama de enfermedades.

FIGURA 1.
Esquema general del proceso de TF en una célula patógena.
Fuente: elaboración propia en la plataforma informática Picsart.



Resultados y discusión

Aumento de inhibición: efecto combinado de terapia fotodinámica antimicrobiana (TFDA) y fluconazol sobre microorganismos fármacorresistentes

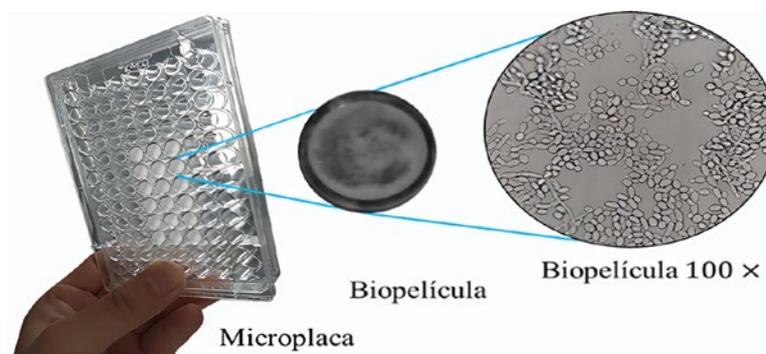
Según el Boletín Infecciones Asociadas a la Atención de la Salud [44], cada trimestre en México se reportan más de diez mil casos de infecciones causadas por microorganismos como *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* y *Candida tropicalis*, entre otros. Estos microorganismos son objeto de numerosos estudios debido a la resistencia antimicrobiana que algunas cepas pueden llegar a presentar, es decir, continúan su crecimiento a pesar de estar sometidas a tratamiento. Una de las principales razones es el uso desmedido y prolongado de fármacos, lo cual provoca la adaptación de dichas especies a diferentes medicamentos y a concentraciones elevadas [14]. Algunos determinantes en el proceso de adaptación son la modificación a nivel celular de los sitios donde se encuentran las



proteínas clave para el funcionamiento de un fármaco, la activación de bombas de flujo (canales que se activan en presencia de un antibiótico y lo expulsan fuera de la célula) y la formación de múltiples estratos denominados *biopelículas*, que impiden a las capas internas interactuar con cualquier agente inhibidor del crecimiento microbiano (Figura 2) [15].

FIGURA 2.

Biopelícula adherida a una microplaca de poliestireno durante su maduración.
Fuente: elaboración propia.

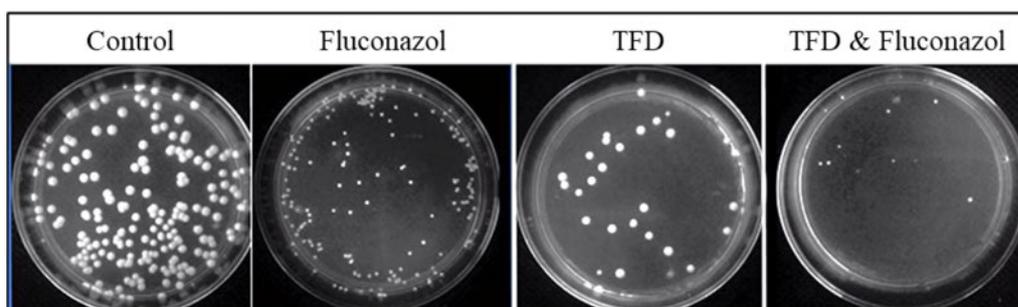


En respuesta a este problema, se han planteado soluciones como la concientización sobre el uso de medicamentos, el empleo de concentraciones óptimas, los tratamientos combinados, el desarrollo de una nueva generación de fármacos y las terapias alternativas, como la TFD. Por ejemplo, Loaiza Toscueto *et al.* mostraron que las cepas de *C. tropicalis* resistentes a antifúngicos no eran inhibidas en más del 10 % al utilizar fluconazol a las concentraciones de 10, 20, 40 y 60 $\mu\text{g/ml}$; no obstante, al aplicar una combinación con TFD y fluconazol [16], ellos lograron inhibir las cepas en más del 95 % (Figura 3). Es decir, no fue necesario inducir concentraciones letales para inhibir las cepas de *C. tropicalis*, por lo que la estrategia de combinar procedimientos puede ser clave en el combate de infecciones.

FIGURA 3.

Cajas de Petri con unidades formadoras de colonias (UFC) de la cepa *C. tropicalis* (MYA-3404) sometidas a tratamientos de fluconazol, TFD (con azul de metileno) y la combinación de ambas terapias.

Fuente: elaboración propia en el software MATLAB.



Dosimetría de luz y dosis de FS en TFD: un desafío crucial para el éxito del tratamiento

El éxito de la TFD depende de la entrega precisa de la luz y del fotosensibilizador. La dosimetría de luz cuantifica la distribución espacial y temporal de la luz irradiada en el tejido [17], mientras que la dosimetría del fotosensibilizador determina



la concentración del mismo en las regiones del tejido [18]. Ajustar la dosimetría presenta retos significativos:

- Heterogeneidad tisular: Las propiedades ópticas de los tejidos varían considerablemente, lo que afecta la propagación de la luz y la distribución del FS, dificultando la predicción exacta de la dosis entregada en diferentes regiones del tejido [19].
- Interacciones luz-tejido: La luz interactúa con el tejido a través de fenómenos como la absorción, la dispersión y la reflexión, lo que altera su distribución espacial y temporal [20]. Modelar con precisión estas interacciones es crucial para la dosimetría de luz.
- Localización del FS: La distribución del FS puede verse afectada por factores como la vascularidad, la permeabilidad tisular y la unión a proteínas. Determinarla es esencial para minimizar los efectos secundarios [21].
- Tecnologías de dosimetría: Las tecnologías actuales para la dosimetría de luz y FS tienen limitaciones. Los métodos invasivos, como las sondas de fibra óptica, ofrecen mediciones precisas, pero son intrusivos y pueden alterar la distribución de la luz [22]. Las técnicas no invasivas, como la tomografía de fluorescencia óptica y la espectroscopía de reflectancia difusa, son menos invasivas, pero pueden tener menor precisión [23].

A pesar de estos retos, se han logrado avances importantes en la dosimetría de luz y FS a través de técnicas como:

- Modelos matemáticos complejos para simular la propagación de la luz y la distribución del FS en los tejidos [24]. Estos modelos incorporan información sobre las propiedades ópticas del tejido, la geometría del sitio de tratamiento y las características de la fuente de luz.
- Tecnologías de imagenología, como la tomografía de coherencia óptica y la tomografía de fluorescencia óptica, visualizan en alta resolución la distribución del FS en el tejido [21].
- Sondas de fibra óptica miniaturizadas y sensibles que permiten realizar mediciones precisas de la luz en diferentes puntos del tejido [25].

La investigación continua en dosimetría de luz y FS es fundamental para optimizar la TFD y mejorar sus resultados terapéuticos. Al superar los retos actuales, se podrá garantizar una entrega precisa de la dosis y maximizar la eficacia del tratamiento mientras se minimizan los efectos secundarios, convirtiendo a la TFD en una herramienta médica aún más poderosa.



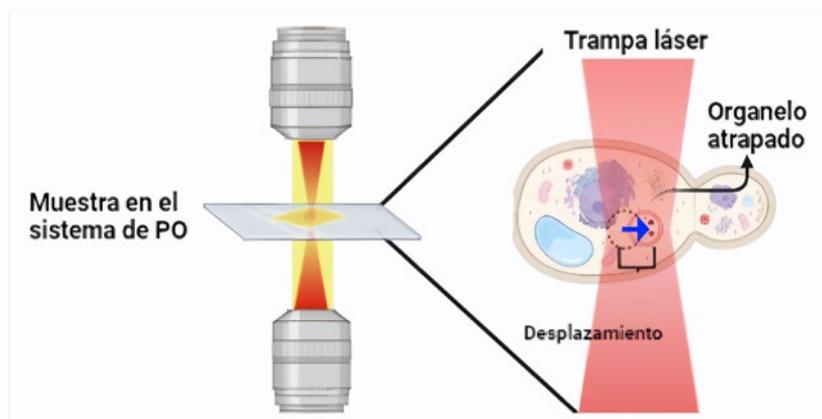
Innovaciones en TFD: explorando la mecánica celular con pinzas ópticas

Las células, además de sus propiedades químicas y biológicas, exhiben características físicas determinantes para su funcionamiento, estructura, movimiento e interacción con el entorno. Por ejemplo, la rigidez y elasticidad les permiten adaptar estructuras específicas para funciones concretas, y afectan su capacidad de adherirse a otras células o superficies [26]. La viscosidad intracelular es también un factor crucial, ya que influye en la señalización mecánica y la transducción de señales [27]. La interacción entre fuerzas mecánicas y respuestas biológicas ha demostrado que las propiedades mecánicas de las células impactan en procesos como la proliferación, diferenciación, migración y muerte celular [28], los cuales pueden ser alterados por tratamientos como la TFD [29]. En este contexto, el estudio de la mecánica celular mediante el uso de pinzas ópticas (PO) emerge como un enfoque innovador con un gran potencial para impulsar la investigación del efecto de la TFD en los procesos de muerte celular. Las PO emiten un rayo láser enfocado, creando una trampa óptica que permite manipular y medir fuerzas a órdenes de magnitud tan pequeños como los picoNewtons. Con esta tecnología es posible atrapar y mover organelos celulares sin dañarlos, gracias a la presión de radiación ejercida por el rayo láser [30]. Las PO destacan por su capacidad de realizar mediciones dinámicas en tiempo real y su naturaleza no invasiva, lo que las convierte en una herramienta invaluable para estudios biológicos y físicos que requieren una manipulación precisa y controlada de las estructuras celulares [31]. Actualmente, se emplea esta tecnología para estudiar la mecánica celular, midiendo la rigidez y viscosidad intracelular durante la muerte inducida por la TFD en un organelo específico (Figura 4).

FIGURA 4.

Esquema de pinzas ópticas y una célula fúngica con un organelo atrapado.

Fuente: elaboración propia en la plataforma informática BioRender.





Este enfoque tiene un gran potencial para profundizar la comprensión de los fenómenos moleculares que subyacen tras la muerte celular y cómo estos afectan las propiedades mecánicas de la célula. Además, ofrece información valiosa para optimizar los protocolos de TFD, ajustando los parámetros de tratamiento en función de las características mecánicas de las células objetivo, y permite desarrollar estrategias terapéuticas más efectivas y seguras.

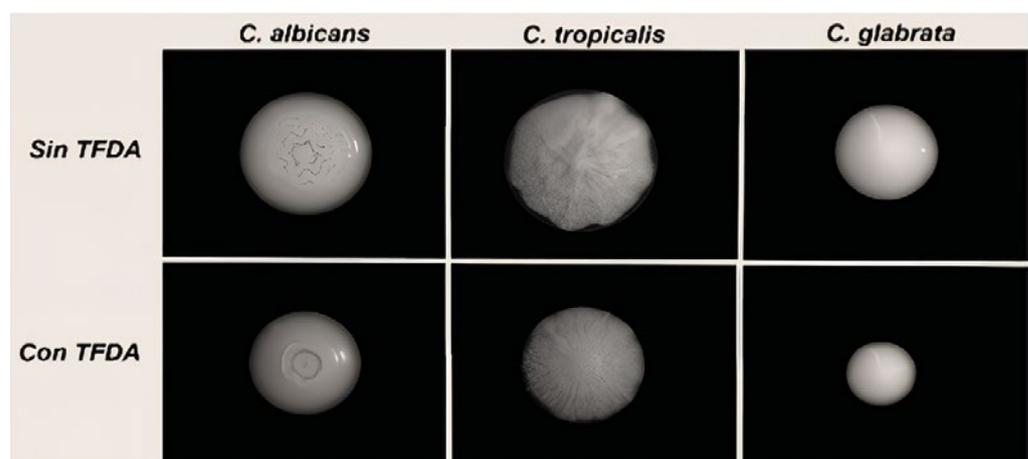
Exploración de características morfológicas en cepas de *Candida* tras la aplicación de TFDA: un enfoque revelador

En los últimos años se han logrado avances en las técnicas alternativas para el tratamiento de infecciones fúngicas [32], especialmente las causadas por especies del género *Candida* [33], que muestran una creciente resistencia a los tratamientos convencionales [34]. Sin embargo, se sabe poco sobre cómo responden las cepas de *Candida* que sobreviven a diferentes tratamientos. Recientemente, en un estudio del laboratorio de TFD del INAOE, se caracterizó y comparó el efecto de la TFDA en un fenómeno conocido como *switching fenotípico* (SF). Este fenómeno permite a las colonias de hongos cambiar su apariencia y estructura, efecto que se ha asociado con una mayor virulencia. Los resultados de la mencionada investigación revelaron que la aplicación de TFDA ralentiza el crecimiento y la aparición de cambios morfológicos derivados del SF en las cepas de *Candida* estudiadas (Figura 5). Este hallazgo es relevante, ya que anteriormente no se habían reportado estudios al respecto en hongos sobrevivientes a la TFDA. La Figura 5 muestra la comparación de colonias de *C. albicans* y *C. tropicalis* con y sin TFDA. Se observa que las tratadas con TFDA son más pequeñas y presentan cambios morfológicos más lentos en comparación con las colonias sin TFDA.

FIGURA 5.

Efecto de la TFDA sobre la morfología de diferentes cepas de *Candida*.

Fuente: elaboración propia en el software MATLAB.





Estos hallazgos contribuyen a optimizar el uso de la TFD como alternativa terapéutica eficaz para el tratamiento de infecciones fúngicas difíciles de erradicar. Comprender cómo responden los patógenos resistentes a este tipo de intervenciones y qué pasa con las células sobrevivientes al tratamiento es clave para desarrollar estrategias más efectivas en el manejo de infecciones.

Nanotecnología y TFD: diseño de nuevos FS

En la última década, las NP han revolucionado la TFD al incrementar la selectividad, eficacia y adaptabilidad en tratamientos contra enfermedades infecciosas y cánceres. Los FS basados en nanopartículas ofrecen una serie de ventajas sobre los FS comunes. Destaca que estas NP son modulables, es decir, pueden modificarse para elegir una región específica de la luz; así, los FS pueden diseñarse para absorber luz visible y prescindir de la UV, que, aunque efectiva contra células patógenas, puede implicar problemas de salud graves en las células humanas, como la mutación celular y consecuentemente el cáncer. Las NP han mostrado un control preciso sobre la acumulación en tumores, mejorando la generación de ROS bajo fotoexcitación. Un ejemplo notable son las NP de conversión ascendente y puntos cuánticos, que permiten la activación con luz de mayor longitud de onda, ideal para penetrar tejidos profundos; asimismo, las NP metálicas, como las de oro y óxido de zinc, potencian los efectos fotodinámicos. En adición, los desarrollos recientes han explorado NP biodegradables basadas en polímeros, porfirinas y polipiridinas de rutenio, que no solo ofrecen propiedades fotofísicas únicas, sino que también reducen los riesgos de toxicidad y mejoran la biocompatibilidad [35], [36].

Diversos grupos de investigación en el mundo se han encargado de diseñar nuevos FS basados en NP cuyo desempeño supere al de los FS convencionales. Sobresalen las NP de porfirina, nanopartículas de oro, cloro E6, polímeros anfifílicos y seleniuro de bismuto como fotosensibilizadores efectivos en TFD contra el cáncer [37]. Estas innovaciones no solo potencian la generación de ROS mediante fotoexcitación, sino que también optimizan la acumulación en tejidos tumorales y la selectividad terapéutica. También es cierto que, con el desarrollo de nuevos nanomateriales, se generan nuevas preocupaciones, tales como los efectos secundarios que pudieran causar debido a su escala. Sin embargo, el arduo trabajo de la comunidad científica ha rendido frutos, pues ahora se cuenta con NP de liposomas, micelas, carbono y oro para su uso en TFD [38].

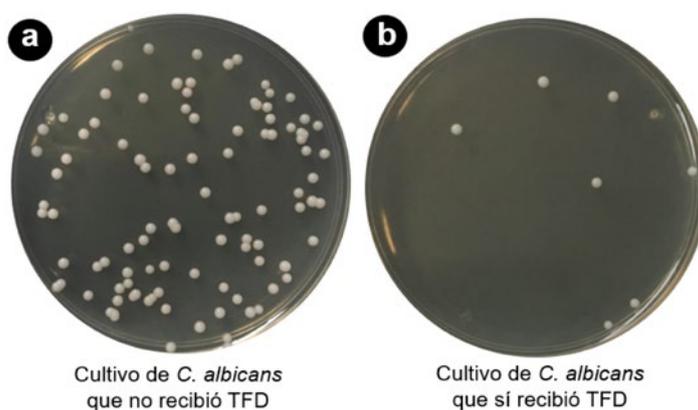
En 2015, la administración de alimentos y medicamentos estadounidense (FDA, por sus siglas en inglés) aprobó el uso de doxil y paclitaxel, NP empleadas en tra-



tamientos contra el cáncer [39]. De manera más reciente, el grupo de Karges, desarrolló con éxito NP de polipiridina de rutenio usado en TFD contra células de carcinoma ovárico humano [40]. Además, va en ascenso el desarrollo de NP de silicio, puntos cuánticos y de conversión ascendente para combatir el cáncer, las cuales generan oxígeno singlete (1O_2) por sí mismos tras una fotoexcitación [41].

No solo se han desarrollado NP para la aplicación de TFD contra el cáncer; el grupo de Bekmukhametova reportó que es posible usarlas contra hongos y bacterias. Las más utilizadas, de plata, cobre, y óxidos de titanio, zinc y grafeno, han sido probadas contra *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumonia*, *C. albicans*, *P. aeruginosa* y *Enterococcus faecalis* [42]. En la Figura 6 se aprecia una comparación entre dos cultivos planctónicos de *C. albicans* (los puntos blanquecinos que contrastan contra el fondo hecho por agar). El inciso *a* muestra UFC que no han recibido TFDA; el inciso *b*, un cultivo similar que recibió TFDA con FS basado en NP de TiO_2 dopadas con plata. Se concluye que la reducción de UFC se debió al efecto de inactivación de la TFDA [43]; entonces, es evidente la capacidad de estos FS para eliminar células patógenas.

FIGURA 6.
Cultivo de *C. albicans*
en agar dextrosa
Sabouraud. a) Sin FS ni
terapia de luz. b) Con
FS y terapia de luz.
Fuente: elaboración
propia en la platafor-
ma informática Picsart.



Conclusiones

La TFD se ha consolidado como una herramienta terapéutica innovadora en biomedicina, integrando FS, luz y oxígeno para abordar eficazmente diversas enfermedades. Su evolución desde el tratamiento de tumores superficiales hasta infecciones resistentes destaca su versatilidad y potencial. Los avances en nanotecnología han optimizado la selectividad y la eficacia de la TFD mediante el desarrollo de FS basados en NP que mejoran la acumulación en tejidos específicos y reducen los efectos secundarios. Asimismo, innovaciones como las pinzas ópticas han permitido explorar la mecánica celular para ajustar los protocolos terapéuticos, mientras que estudios recientes sobre infecciones fúngicas resistentes han evidenciado el impac-



to positivo de la TFD combinada con fungicidas convencionales. Estos avances no solo demuestran la capacidad de la TFD para superar desafíos terapéuticos, como la resistencia antimicrobiana y la dosimetría de luz, sino que también destacan el valor de la investigación científica realizada en México, ejemplificada por el trabajo realizado en el INAOE. Este progreso refuerza el papel de la TFD como una alternativa eficaz, sostenible y menos invasiva para el tratamiento de una amplia gama de patologías.

Agradecimientos

Los autores expresamos agradecimiento a Mayra F. Salazar Morales, del laboratorio de terapia fotodinámica del INAOE, cuya experiencia y dedicación fueron fundamentales para el éxito de estas investigaciones.

Referencias

- [1] U. E. Steiner, "Fundamentals of photophysics, photochemistry and photobiology", en *Photodynamic Therapy, From Theory to Application*, M. H. Abdel-Kader, Ed., Springer, 2014.
- [2] J. H. Correia, J. A. Rodrigues, S. Pimenta y T. Dong, Z. Yang, "Photodynamic therapy review: Principles, photosensitizers, applications, and future directions", *Pharmaceutics*, vol. 13, núm 9, pp. 1-16, 2021, doi: 10.3390/pharmaceutics13091332
- [3] R. Ackroyd, C. Kelty, N. Brown y M. Reed, "The History of Photodetection and Photodynamic Therapy", *Photochemistry and Photobiology*, vol. 74, núm. 5, 2001, doi: 10.1562/0031-8655(2001)074<0656:thopap>2.0.co;2z
- [4] S. A. Miller, J. P. Ferreira y J. T. Lejeune, "Antimicrobial Use and Resistance in Plant Agriculture: A One Health Perspective", *Agriculture*, vol. 12, núm 2, pp. 1-27, 2022, doi: 10.3390/agriculture12020289
- [5] C. P. Sabino et al., "Global priority multidrug-resistant pathogens do not resist photodynamic therapy", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 208, art. 111893, 2020, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2020.111893
- [6] R. R. Allison, G. H. Downie, R. Cuenca, X. H. Hu, C. J. H. Childs y C. H. Sibata, "Photosensitizers in clinical PDT", *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, vol. 1, núm 1, pp. 27-42, 2004, doi: 10.1016/S1572-1000(04)00007-9
- [7] T. Nann, "Nanoparticles in photodynamic therapy", *Nano Biomedicine and Engineering*, vol. 3, núm. 2, pp. 137-143, 2011, doi: 10.5101/nbe.v3i2.p137-143
- [8] D. H. Sliney, "What is light? the visible spectrum and beyond", *Eye*, vol. 30, núm. 2, pp. 222-229, 2016, doi: 10.1038/eye.2015.252.
- [9] A. P. Castano, T. N. Demidova y M. R. Hamblin, "Mechanisms in photodynamic therapy: part one-photosensitizers, photochemistry and cellular localization", *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, vol. 1, núm. 4, pp. 279-293, 2004, doi: 10.1016/S1572-1000(05)00007-4
- [10] J. P. J. Merlin, A. Crous y H. Abrahamse, "Combining Photodynamic Therapy and Targeted Drug Delivery Systems: Enhancing Mitochondrial Toxicity for Improved Cancer Outcomes", *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, núm. 19, 2024, doi: 10.3390/ijms251910796
- [11] A. M. Rkein y D. M. Ozog, "Photodynamic therapy", *Dermatologic Clinics*, vol. 32, núm. 3, pp. 415-425, 2014, doi: 10.1016/j.det.2014.03.009
- [12] H. Yu et al., "AIE-Active Photosensitizers: Manipulation of Reactive Oxygen Species Generation and Applications in Photodynamic Therapy", *Biosensors*, vol. 12, núm. 5, art. 348, 2022, doi: 10.3390/bios12050348
- [13] G. K. Couto, F. K. Seixas, B. A. Iglesias y T. Colares, "Perspectives of photodynamic therapy in biotechnology", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 213, art. 112051, 2020, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2020.112051
- [14] J. Flórez, "La Farmacología: concepto y objetivos", en *Farmacología Humana*, Elsevier Masson, 1997.
- [15] J. Morschhäuser, "Regulation of multidrug resistance in pathogenic fungi", *Fungal Genetics and Biology*, vol. 47, pp. 94-106, 2010, doi: 10.1016/j.fgb.2009.08.002
- [16] D. I. Loaiza Toscueto, D. Vázquez Domínguez, A. P. Taxis Espinosa, J. C. Ramírez



- San-Juan, R. Ramos García y T. Spezzia Mazzocco, "The Impact of Methylene Blue in Antimicrobial Photodynamic Therapy Against Different *Candida* Species and its Synergy with Fluconazole", *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 57, núm. 1, art. 51159, 2024, doi: 10.7149/OPA.57.1.51159
- [17] A. Johansson, J. Axelsson, S. Andersson Engels y J. Swartling, "Realtime light dosimetry software tools for interstitial photodynamic therapy of the human prostate", *Medical Physics*, vol. 34, núm. 11, 2007, pp. 4309-4321, doi: 10.1118/1.2790585
- [18] C. Sheng, B. W. Pogue, E. Wang, J. E. Hutchins y P. J. Hoopes, "Assessment of Photosensitizer Dosimetry and Tissue Damage Assay for Photodynamic Therapy in Advanced-stage Tumors", *Photochemistry and Photobiology*, vol. 79, núm. 6, pp. 520-525, 2004, doi: 10.1562/mu-03-33.1
- [19] J. L. Sandell y T. C. Zhu, "A review of *in-vivo* optical properties of human tissues and its impact on PDT", *Journal of Biophotonics*, vol. 4, núm. 11-12, pp. 773-787, 2011, doi: 10.1002/jbio.201100062
- [20] V. V. Tuchin, *Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis*, 3^{ra} edición, Spie Press, 2015, doi: 10.1117/3.1003040
- [21] J. A. Kim, D. J. Wales y G. Z. Yang, "Optical spectroscopy for *in vivo* medical diagnosis — A review of the state of the art and future perspectives", *Progress in Biomedical Engineering*, vol. 2, núm. 4, art. 042001, 2020, doi: 10.1088/2516-1091/abaaa3
- [22] G. Gunaydin, M. E. Gedik y S. Ayan, "Photodynamic Therapy—Current Limitations and Novel Approaches", *Frontiers in Chemistry*, vol. 9, 2021, doi: 10.3389/fchem.2021.691697
- [23] G. Thenuwara, J. Curtin y F. Tian, "Advances in Diagnostic Tools and Therapeutic Approaches for Gliomas: A Comprehensive Review", *Sensors*, vol. 23, núm. 24, 2023, art. 9842, doi: 10.3390/s23249842
- [24] B. Liu, T. J. Farrell y M. S. Patterson, "A dynamic model for ALA-PDT of skin: simulation of temporal and spatial distributions of ground-state oxygen, photosensitizer and singlet oxygen", *Physics in medicine and biology*, vol. 55, núm. 19, pp. 5913-5932, 2010, doi: 10.1088/0031-9155/55/19/019
- [25] J. Li, S. C. Warren Smith, R. A. McLaughlin y H. Ebendorff Heidepriem, "Single-fiber probes for combined sensing and imaging in biological tissue: recent developments and prospects", *Biomedical Optics Express*, vol. 15, núm. 4, pp. 2392-2405, 2024, doi: 10.1364/BOE.517920
- [26] H. Huang, R. D. Kamm y R. T. Lee, "Cell mechanics and mechanotransduction: pathways, probes, and physiology", *American Journal of Physiology. Cell Physiology*, vol. 287, núm. 1, 2004, doi: 10.1152/ajpcell.00559.2003
- [27] C. T. Mierke, "Viscoelasticity, Like Forces, Plays a Role in Mechanotransduction", *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, vol. 10, pp. 1-58, 2022, doi: 10.3389/fcell.2022.789841
- [28] C. Zhu, G. Bao y N. Wang, "Cell mechanics: Mechanical response, cell adhesion, and molecular deformation", *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 2, pp. 189-226, 2000, doi: 10.1146/annurev.bioeng.2.1.189
- [29] D. Kessel y N. L. Oleinick, "Cell Death Pathways Associated with Photodynamic Therapy: An Update", *Photochemistry and Photobiology*, vol. 94, núm. 2, pp. 213-218, 2018, doi: 10.1111/php.12857
- [30] K. Volke, I. Ricárdez y R. Ramos, "Pinzas ópticas: las delicadas manos de la luz", *Repositorio INAOE - Ciencia*, 2007. [En línea]. Disponible: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/944>.
- [31] G. Pesce, P. H. Jones, O. M. Maragò, G. Volpe, "Optical tweezers: theory and practice", *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, art. 949, 2020, doi: 10.1140/epjp/s13360-020-00843-5.
- [32] L. M. Baltazar, A. Ray, D. A. Santos, P. S. Cisalpino, A. J. Friedman y J. D. Nosanchuk, "Antimicrobial photodynamic therapy: An effective alternative approach to control fungal infections", *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, pp. 1-11, 2015, doi: 10.3389/fmicb.2015.00202
- [33] J. Ríos *et al.*, "Terapia fotodinámica antimicrobiana sobre *Candida albicans* en superficies acrílicas de prótesis dentales. Estudio *in vitro*", *Rev. Eugenio Espejo*, vol. 16, núm. 3, pp. 72-82, 2022, doi: 10.37135/ee.04.15.08
- [34] L. do Prado-Silva, G. T. P. Brancini, G. Ú. L. Braga, X. Liao, T. Ding, A. S. Sant'Ana, "Antimicrobial photodynamic treatment (aPDT) as an innovative technology to control spoilage and pathogenic microorganisms in agri-food products: An updated review", *Food Control*, vol. 132, art. 108527, 2022, doi: 10.1016/j.foodcont.2021.108527.
- [35] B. Yang, Y. Chen y J. Shi, "Reactive oxygen species (ROS)-based nanomedicine", *Chemical Reviews*, vol. 119, núm. 8, pp. 4881-4985, 2019, doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00626
- [36] S. S. Lucky, K. C. Soo y Y. Zhang, "Nanoparticles in photodynamic therapy", *Chemical Reviews*, vol. 115, núm. 4, pp. 1990-2042, 2015, doi: 10.1021/cr5004198
- [37] X. Wang, J. Peng, C. Meng y F. Feng, "Recent advances for enhanced photodynamic therapy: from new mechanisms to innovative strategies", *Chemical Science*, vol. 15, pp. 12234-12257, 2024, doi: 10.1039/d3sc07006a
- [38] X. Li, J. F. Lovell, J. Yoon y X. Chen, "Clinical development and potential of photothermal and photodynamic therapies for cancer", *Nature Reviews Clinical Oncology*, vol. 17, pp. 657-674, 2020, doi: 10.1038/s41571-020-0410-2
- [39] D. B. Tada y M. S. Baptista, "Photosensitizing nanoparticles and the modulation of ROS generation", *Frontiers in Chemistry*, vol. 3, pp. 1-14, 2015, doi: 10.3389/fchem.2015.00033
- [40] J. Karges, D. Díaz García, S. Prashar, S. Gómez Ruiz y G. Gasser, "Ru(II) Polypyridine Complex-Functionalized Mesoporous Silica Nanoparticles as Photosensitizers for Cancer Targeted Photodynamic Therapy", *ACS Applied Bio Materials*, vol. 4, núm 5, pp. 4394-4405, 2021, doi: 10.1021/acsbm.1c00151



- [41] P. Agostinis *et al.*, "Photodynamic therapy of cancer: An update", *CA. Cancer J. Clin.*, vol. 61, núm. 4. , pp. 250-281, 2011, doi: 10.3322/caac.20114
- [42] A. Bektukhmetova, H. Ruprai, J. M. Hook, D. Mawad, J. Houang y A. Lauto, "Photodynamic therapy with nanoparticles to combat microbial infection and resistance", *Nanoscale*, vol. 12, núm. 41, pp. 21034–21059, 2020, doi: 10.1039/d0nr04540c
- [43] R. Lozano Rosas, R. Ramos García, M. F. Salazar Morales, M. J. Robles Águila, T. Spezzia Mazzocco, "Evaluation of antifungal activity of visible light-activated doped TiO_2 nanoparticles", *Photochemical & Photobiological Sciences*, Vol. 23, pp. 823-837, 2024, doi: 10.1007/s43630-024-00557-y
- [44] Secretaría de Salud, *Boletín Infecciones Asociadas a la Atención de la Salud*, México, 2023.



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

 perspectivasci@uaq.mx

REVISTA INCLUIDA EN:



VISITA NUESTRO

FISIÓN
PODCAST

Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

 **DESPACHO DE
PUBLICACIONES**

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO**
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA