

ISSN: en trámite

# Materiales Avanzados



# Salud y materiales

N° 3 • Año 2  
Julio - diciembre 2023



Instituto de  
Investigaciones  
en Materiales

# Universidad Nacional Autónoma de México

## **Rector**

Enrique Graue Wiechers

## **Secretario General**

Leonardo Lomelí Vanegas

## **Coordinador de la Investigación Científica**

William Lee Alardín

# Instituto de Investigaciones en Materiales

## **Director**

José Israel Betancourt Reyes

## **Secretario Académico**

Jaime Enrique Lima Muñoz

## **Editora responsable**

Rocío Guadalupe de la Torre Sánchez

## **Coordinador editorial y de divulgación**

Astron Rigel Martínez Rosas

## **Comité editorial:**

Armando Reyes Montero

Chumin Wang Chen

Elí Sánchez González

Heriberto Pfeiffer Perea

Joaquín de la Torre Medina

Maricela Zapata Arroyo

Michel Rivero Corona

## **Producción:**

### **Editorial IIM**

Editor científico: Rocío Guadalupe de la Torre Sánchez

Comunicación Pública de la Ciencia: Julieta Reyes Arango

Editor digital: Omar Alejandro Pompa García

Diseño editorial: Celic Martínez Cañedo



Instituto de  
Investigaciones  
en Materiales

La reproducción del material aquí mostrado se permite siempre y cuando: se cite esta revista, se reconozca a los autores y no sea utilizado con fines comerciales.

## Editorial

MATERIALES AVANZADOS, Año 21, No. 39, julio-diciembre 2023, es una publicación semestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, a través del Instituto de Investigaciones en Materiales, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, Tel. (55)56224500 y (55)56224581, URL: <https://revista.iim.unam.mx/>, correo electrónico: [revista@materiales.unam.mx](mailto:revista@materiales.unam.mx). Editora responsable: Dra. Rocío Guadalupe de la Torre Sánchez, correo electrónico: [vinculacion@materiales.unam.mx](mailto:vinculacion@materiales.unam.mx). Reserva de Derechos al uso Exclusivo 04-2023-062711234500-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dra. Rocío Guadalupe de la Torre Sánchez, Secretaría de Vinculación del Instituto de Investigaciones en Materiales, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P.04510, Ciudad de México fecha de la última modificación, 1 de julio de 2023.

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja el punto de vista de los árbitros, del Editor o de la UNAM.

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.

## Presentación

Las aplicaciones médicas de los materiales son bastas y abarcan diferentes líneas de investigación que se desarrollan en nuestro Instituto. El presente número de la revista *Materiales Avanzados* presenta una diversidad de temas relacionados con la salud, incluyendo la nutrición humana y animal, la exploración del uso del sorgo para elaborar productos libres de gluten; así como el artículo que explora novedades alternativas para el diseño de biomateriales a partir de almidones modificados.

En este primer volumen se abordan temas que relacionan a los materiales con la salud, también encontrarán inesperadas aplicaciones de conocidos fármacos, como el uso de derivados del mercaptobenzimidazol (utilizados en el tratamiento de la gastritis a nivel global) para evitar la corrosión en la industria petrolera o el uso de titanato de bismuto para la degradación de los populares antibióticos tetraciclínicos, que cada día preocupan más por la creciente resistencia microbiana. De igual manera, se exploran nuevas alternativas comerciales para la administración de medicamentos en una colaboración con Merck.

Entre los temas selectos de Ciencia e Ingeniería de Materiales, tenemos un excelente artículo de la sede del IIM en Morelia que revisa las propiedades del galio metálico; otro sobre clasificación, estructura y propiedades de los materiales cerámicos; el futuro prometedor de las aleaciones de alta entropía, y las creativas aplicaciones que General Motors, Volkswagen o Mercedes Benz le están dando a los nanomateriales en la mejora de autopartes. También hay artículos de Ciencia Básica en los que se exploran los fenómenos de transición de espín, fenómenos magnéticos en nanopartículas y una propuesta experimental de ciencia en casa para estimar la velocidad de la luz cocinando quesadillas en hornos de microondas.

Ponemos a su disposición una infografía que presenta las distintas generaciones de biomateriales que se han creado hasta la fecha.

Una entrevista que nos llevará a conocer más sobre medicina aeroespacial (y dónde es que se estudia aquí en México). Dos artículos complementarios que abordan el tema de moda, relacionado con los microplásticos y su impacto en la salud humana y de los ecosistemas. Dos inéditos estudios de caso clínicos, uno en materia de salud mental y otro de ginecología. También encontrarán estrategias de Design Thinking aplicadas en los negocios en el área de nanotecnología.

Esperamos que nuestra cuidadosa selección de artículos sirva para mostrarles las inesperadas colaboraciones multidisciplinarias que surgen del objetivo en común de velar por la salud humana y el bienestar social.

Agradecemos su preferencia al leer nuestros contenidos, publicar con nosotros y darle difusión a nuestra revista de *Materiales Avanzados*.

Rocío Guadalupe de la Torre Sánchez  
Editora responsable

# Índice

- 10** Metal líquido a temperatura ambiente: galio y sus aleaciones  
*Alberto Beltrán Morales*
- 14** El fascinante mundo del fenómeno de transición de espín  
*Yosuan Avila García, Jorge Balmaseda Era*
- 21** Fenómenos magnéticos en nanopartículas de materiales antiferromagnéticos  
*Carlos Luna Criado, Raquel Murillo Ortiz, Diana Castañeda Rodríguez<sup>1</sup>, Enrique Díaz Barriga Castro, Raquel Mendoza Reséndez*
- 29** Uso de sustancias activas de medicamentos derivados del 2-mercaptobenzimidazol como inhibidores de corrosión en la industria petrolera  
*Araceli Espinoza Vazquez, Ricardo Orozco Cruz, Guillermo E. Negrón Silva, Manuel Palomar Pardavé, Ricardo Galván Martínez, Ignacio A. Figueroa Vargas*
- 36** Micro y nanoplásticos: los que no salen en la foto  
*Ana Martínez Vázquez*

- 44 Titanato de bismuto para la fotodegradación de tetraciclina**  
*Agileo Hernández Gordillo, Vasti Zabdiel Martínez Flores, Sandra E. Rodil Posada*
- 48 Microplásticos: un nuevo tipo de contaminantes emergentes y persistentes**  
*Esmeralda Rivera-Gutiérrez, Sonia Martínez-Gallegos, Ma. Guadalupe Macedo-Miranda, Javier Illescas*
- 60 Uso del sorgo (*Sorghum bicolor*) en la elaboración de productos libres de gluten**  
*Melissa Rodríguez España, Claudia Yuritzí Figueroa Hernández,*  
*Patricia Rayas-Duarte, Mirna Leonor Suarez Quiroz, Zorba Josué Hernández Estrada*
- 69 Útero didelfo bicollis: reporte de caso**  
*Karen Marlene Ortiz Pérez, Alejandro Arturo Solano Gómez*
- 72 Aplicación de los nanomateriales en la mejora de autopartes: inicio de una nueva era en el desarrollo de automóviles**  
*Rafael Álvarez Chimal, Rosario Tavera Hernández y Jesús Ángel Arenas Alatorre*
- 81 Silicio poroso en teranóstico humano**  
*Estíbaliz M. Ramírez y Chumin Wang*
- 87 ¡Hablemos de Medicina Aeroespacial!, con el médico Ricardo Martínez Tapia**  
*Astron Martínez*

- 91** Novedosas alternativas para el diseño de biomateriales a partir de almidones modificados dualmente  
*Lucila Concepción Núñez-Bretón, Luis Medina-Torres, Diola Marina Núñez-Ramírez, Barbara Cooper-Bribiesca, Mónica Reyes-Reyes, José Esteban López-Aguilar, Francisco Erik González-Jiménez, O. Manero*
- 102** Biomateriales y sus generaciones  
*María Cristina Piña Barba*
- 104** Aleaciones de alta entropía: materiales emergentes con un futuro prometedor  
*J. Zamora, Rafael. G. Suarez, M. A. Camacho-Peralta*
- 114** Los materiales cerámicos: definición, clasificación y breve descripción de su estructura y propiedades  
*Lorena G. Cuéllar-Herrera, José Antonio Raya-Colín, C. Carrera-Figueiras, José Ortiz-Landeros*
- 124** Salud mental diversa: Estudio de caso de una persona trans adulta mayor con antecedentes suicidas  
*Joel Alejandro Hernández Rico*
- 131** “Design Thinking”: la herramienta para Innovar y acelerar nuevos negocios en el área de nanotecnología.  
*Amanda Anselmi Baumgartner, Ángel Martínez*

**136** Merck en la administración de medicamentos  
*Elizabeth Aisenbrey, Alain Flores*

**141** Apoyo a lo docencia: Estima la velocidad de la luz (cocinando quesadillas)  
*Astron Martínez*





# Artículos



# Metal líquido a temperatura ambiente: galio y sus aleaciones

**Alberto Beltrán Morales**

Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de  
San José de la Huerta C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México  
[albem@materiales.unam.mx](mailto:albem@materiales.unam.mx)

## Resumen

El uso de metales líquidos a temperatura ambiente cobra relevancia en recientes aplicaciones tecnológicas y en temas de frontera de la ciencia; dentro de dichos metales destaca el galio y sus aleaciones. En este trabajo se presentan algunas de sus características y aplicaciones. Finalmente, se proporciona información visual de una aleación de galio con la que se cuenta en el laboratorio.

## Palabras clave:

Metal líquido, galio, almacenamiento de energía, baterías de Metal líquido.

Al hablar de metales líquidos (MLs) tal vez la primera idea que viene a nuestra mente es el mercurio (Hg), ampliamente usado en la fabricación de termómetros. ¡Cómo olvidar el mercurio encapsulado en vidrio y usado en collares que se vendían en las ferias de pueblos! Imposible también no

recordar películas de ciencia ficción como la saga Terminator, donde una masa de metal líquido saliendo del parabrisas de un automóvil adquiere forma humana. Es importante mencionar que además del Hg, a temperatura ambiente también se tiene el galio (Ga) en forma líquida, elemento metálico de apariencia similar al Hg y usado en aplicaciones electrónicas. China produce el 97 % del Ga a nivel mundial. En comparación con Hg y sus aleaciones, el Ga es fácil de manipular en el laboratorio y es más amigable ambientalmente. Reacciona con el aire y agua formando una capa de óxido, lo cual puede minimizarse si se manipula en una atmósfera inerte. Puede fácilmente mantenerse en estado líquido en la palma de la mano (temperatura corporal de 36 °C) o en cualquier laboratorio.

Se pueden formar aleaciones a temperatura ambiente a base de Ga y elementos como el indio, bismuto, antimonio y zinc.

Probablemente, uno de los MLs más usados en ciencia y tecnología sea la aleación eutéctica de Galio-Indio-Estaño (GaInSn), conocido como galinstano o galinstan y con composiciones típicas de 67 % de Ga, 20.5 % de In y 12.5 % de Sn. El GaInSn es químicamente compatible con una amplia variedad de metales, plásticos y vidrio a temperatura ambiente, y es usado como reemplazo del Hg. Interesantemente, presenta superconductividad (pérdida de resistencia eléctrica) a temperaturas por debajo de 6.6 K. El GaInSn puede ser limpiado fácilmente con una solución de etanol y ácido clorhídrico. Una de las principales desventajas de los MLs es el elevado costo, por ejemplo, para la aleación eutéctica de Ga75.5In24.5 el precio (a la fecha) es del orden de 400 USD por 25 g [1].

Los MLs son adquiridos de los proveedores, envasados en recipientes plásticos y envasados en una atmósfera de argón, para minimizar la formación de óxidos. Una vez abiertos, los MLs se suelen envasar en recipientes de vidrio con una solución de ácido clorhídrico (al 5 % en volumen) y agua, de tal forma que, por diferencia de densidad, dicha solución forma una capa delgada en la parte superior del recipiente. La Figura 1 muestra una masa de GaInSn contenida en recipientes de vidrio y plástico. En el siguiente enlace de internet puede observarse la agitación del recipiente de vidrio.

<http://132.247.224.53/owncloud/index.php/s/VfLXvmcFCvPWHTZ>

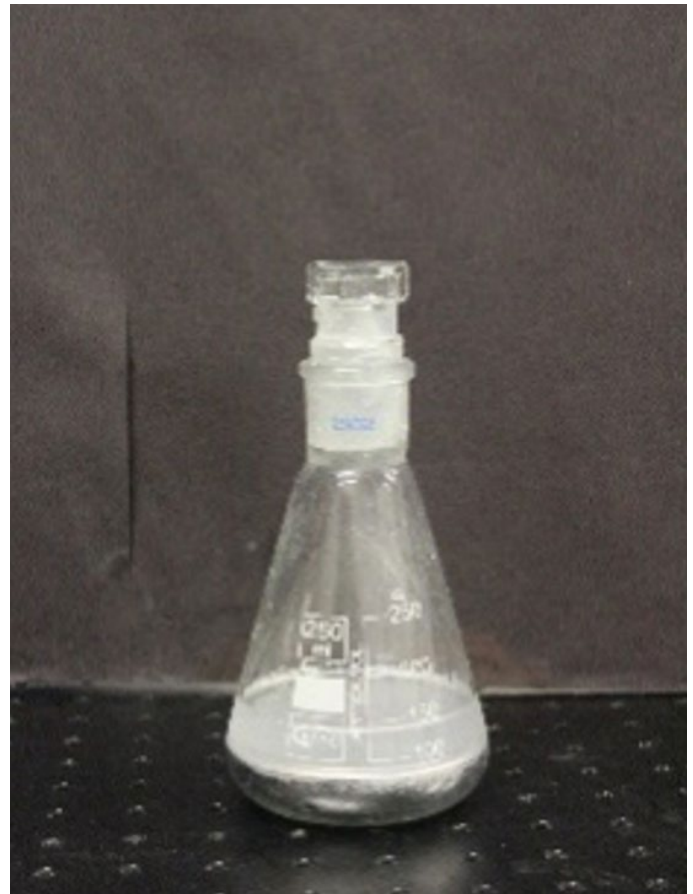


Figura 1. Aleación de GaInSn en un recipiente de plástico (izquierda) y vidrio (derecha)

La Tabla 1 muestra la temperatura de fusión; además de algunas propiedades de transporte y eléctricas de MLs y aleaciones [2].

| Variable/Metal   | Ga <sup>67</sup> In <sup>20.5</sup> Sn <sup>12.5</sup> | Ga                    | Ga <sup>75.5</sup> In <sup>24.5</sup> | Li                   | Hg                    |
|--|--|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Temperatura de fusión (°C)                                 | 10.5   | 29.8                  | 15.5                                  | 180.5                | -38.8                 |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )                              | 6360   | 6080                  | 6280                                  | 534                  | 1353                  |
| Viscosidad (m <sup>2</sup> /s)                             | 2.98x10 <sup>-7</sup>                                  | 3.24x10 <sup>-7</sup> | 2.7x10 <sup>-7</sup>                  | 6.4x10 <sup>-7</sup> | 13.5x10 <sup>-7</sup> |
| Conductividad eléctrica (Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ) | 3.1x10 <sup>6</sup>                                    | 3.7x10 <sup>6</sup>   | 3.4x10 <sup>6</sup>                   | 2.8x10 <sup>6</sup>  | 1.0x10 <sup>6</sup>   |

Tabla 1. Propiedades de transporte y eléctricas de MLs y sus aleaciones [2]

Como se observa, el Ga y sus aleaciones son seis veces más densos y alrededor de tres veces menos viscosos que el agua (8.91x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s). Su conductividad eléctrica es seis ordenes de magnitud mayor que la del agua de mar (≈ 4 Ω<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>). Muchos de los MLs no mojan fácilmente las superficies, calentarlas ligeramente puede resolver el problema [2].

Recientemente, las aleaciones de Ga cobraron relevancia en la fabricación de dispositivos flexibles para actividades deportivas y médicas, capaces de medir en tiempo real variables como presión arterial, niveles de oxígeno y frecuencia cardíaca, entre otras. El ML es encapsulado por materiales que soportan deformaciones considerables (polímeros), también se tiene la tecnología de impresión 3D donde se ha mostrado que el ML es capaz de formar ciertas estructuras (alambres, arcos y puentes) [3]. Los óxidos de Ga tienen actividad fotocatalítica y han sido usados con éxito para la degradación de compuestos orgánicos y colorantes [4].

En el tema de almacenamiento estacionario de energía a gran escala, se tiene la tecnología de baterías de metal líquido (BML), formadas por tres capas estratificadas de fluidos conductores: MLs para el ánodo y cátodo, además de un electrolito a base de sal fundida que los separa. Al usar MLs se evita la formación de filamentos delgados (dendritas) después de varios ciclos de carga/descarga y que son causantes de fallos en baterías como las de ión-litio. La alta conductividad de los metales minimiza las pérdidas de calor generado por el paso de una corriente eléctrica a través de un conductor metálico (efecto Joule) y al estratificarse por diferencia de densidad se simplifica el diseño y manufactura. Se ha reportado en la literatura que, debido a la interacción de la corriente eléctrica con el campo magnético (fuerza de Lorentz) y diferencias de temperatura (convección), se genera movimiento de los fluidos al interior de una BML [5, 6]. Lo anterior puede conducir a condiciones óptimas de desempeño o de un corto circuito para el caso de mezclado intenso.

Dentro de las líneas de investigación de la Unidad Morelia se tiene el estudio de fenómenos de transporte asociados a las BML y de degradación fotocatalítica usando MLs. Se agradece el apoyo de los proyectos CONACyT CF-2023-I-1373, UNAM-DGAPA-PAPIIT IN107722 y UNAM-DGAPA-PAPIME PE104622.

## Referencias

- [1] [https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/aldrich/495425?gclid=CjwKCAjwp9qZBhBkEiwAsY-FsbzrKml-6EwbhwBJxZcKS0f2Yx\\_9Y6LJD\\_a-sgteVSrP-q3cFypalO7RoCVPUQAvD\\_BwE&gclidsrc=aw.ds](https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/aldrich/495425?gclid=CjwKCAjwp9qZBhBkEiwAsY-FsbzrKml-6EwbhwBJxZcKS0f2Yx_9Y6LJD_a-sgteVSrP-q3cFypalO7RoCVPUQAvD_BwE&gclidsrc=aw.ds)
- [2] N. Morley, J. Burris, L. C. Cadwallader, M. D. Nornberg. Gallium usage in the research laboratory. *Review of Scientific Instruments* 2008, 79, 056107.
- [3] C. Ladd, J. H. So, J. Muth, M. D. Dickey. 3D printing of free standing liquid metal microstructures. *Adv. Mater.* 2013, 25, 5081-5085.
- [4] S. Orozco, M. Rivero, E. Montiel, J. Espino-Valencia. Gallium Oxides Photocatalysts Doped With Fe Ions for Discoloration of Rhodamine Under UV and Visible Light. *Frontiers in Environmental Science* 2022, 10, 884758.
- [5] T. L. Aguilar-García, M. Rivero, J. Núñez, I. Alfonso, A. Beltrán. Effect of electromagnetically driven liquid metal flows on the electric potential difference in a cuboid vessel. *Journal of Power Sources* 2021, 483, 229162.
- [6] D. H. Kelley, T. Weier. *Fluid Mechanics of Liquid Metal Batteries*. ASME. *Appl. Mech. Rev.* 2018, 70(2): 020801.



# El fascinante mundo del fenómeno de transición de espín

Yosuan Avila García, Jorge Balmaseda Era

Departamento de Polímeros,

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México

[yosuan.ag87@gmail.com](mailto:yosuan.ag87@gmail.com)

[balmaseda@comunidad.unam.mx](mailto:balmaseda@comunidad.unam.mx)

## Resumen

El fenómeno de transición de espín o Spin crossover (SCO) sigue siendo, a varias décadas de su descubrimiento, un fenómeno fascinante. Utilizando el SCO es posible desarrollar: sensores, actuadores, sistemas para el almacenamiento de información, etc. En este trabajo se aborda brevemente la historia del SCO. Además, se explica, de manera didáctica, el fenómeno y las condiciones en que ocurre. También se mencionan los bloques moleculares y ligantes orgánicos más utilizados para desarrollar materiales que exhiban el fenómeno, así como las técnicas analíticas empleadas para estudiar el fenómeno. Por último, se mencionan los nuevos avances en la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones.

## Palabras Clave:

Spin crossover, magnetismo, materiales multifuncionales, polímeros de coordinación, teoría del campo cristalino.

## Introducción al fenómeno de transición de espín

El fenómeno de transición de espín es uno de los fenómenos más fascinantes que ocurren en la química de coordinación inorgánica [1]. El fenómeno es también conocido como Spin crossover (SCO, por sus siglas en inglés) aunque este término no solo se refiere a la transición de espín, sino a ella y a los cambios macroscópicos que ocurren en todo el material derivados de la transición de espín. Los cambios macroscópicos se deben a transiciones de fase sólido-sólido que modifican las propiedades magnéticas, eléctricas y ópticas del material en que ocurre la transición de espín. El descubrimiento del fenómeno de transición de espín se realizó a principios de la década de 1930, cuando Cambi y colaboradores informaron sobre la observación de propiedades magnéticas inusuales de los complejos de ditiocarbamato de hierro (III) [2][3][4]. Luego, Pauling y colaboradores continuaron con el estudio de este fenómeno en varios

derivados de complejos de hierro (II) y (III) [5]. Ellos notaron que los estados de espín de estos compuestos eran sensibles a la naturaleza de sus ligandos axiales. Veinte años después, Orgel explica, por primera vez, el comportamiento anómalo del magnetismo de los materiales estudiados por Cambi y Pauling, a partir de un cambio en la configuración electrónica de los átomos de hierro.

Con el desarrollo de la teoría del campo de ligandos [6][7], comúnmente denominada teoría del campo cristalino en la física del estado sólido, se introduce un modelo teórico que, combinado con la teoría de grupos, se ha aplicado con éxito para explicar propiedades químicas y físicas de los complejos de metales de transición. En particular, la teoría permite explicar los cambios de propiedades asociadas al fenómeno de transición de espín y estimar la energía térmica necesaria para que ocurra. La teoría del campo cristalino permitió proponer otros metales en los que podía ocurrir el fenómeno de transición de espín.

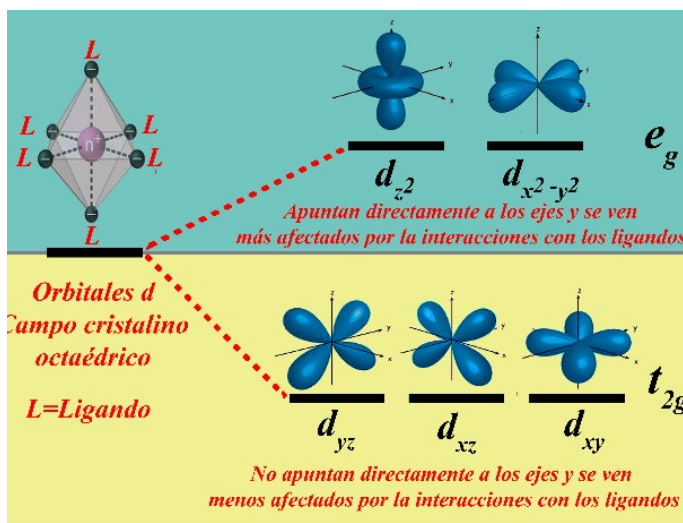


Figura 1. Desdoblamiento de los orbitales d en un campo octaédrico cristalino. Disposición y forma de los orbitales  $t_{2g}$  y  $e_g$

Los orbitales d de los iones metálicos de cromo, manganeso, hierro y cobalto; con configuraciones electrónicas de  $d^4$  a  $d^7$ , en los compuestos de coordinación octaédricos, pueden estar en la dirección de los ligandos o no. Los orbitales que están en la dirección de los ligandos se conocen como orbitales  $e_g$ , el resto se conoce como orbitales  $t_{2g}$ . Los orbitales  $e_g$  tienen mayor energía debido a la repulsión de los ligandos (Figura 1). Si la diferencia de energía entre los orbitales  $e_g$  y  $t_{2g}$  es mucho mayor que la energía térmica ( $kT$ ), los electrones solo ocupan los orbitales  $t_{2g}$  y se dice que el átomo está en configuración bajo espín. En caso contrario, el átomo está en configuración alto espín (Figura 1).

La diferencia de energía entre los orbitales  $e_g$  y  $t_{2g}$  se conoce como el desdoblamiento del campo cristalino ( $10Dq$ ). El  $10Dq$  está influenciado por la naturaleza del ligando que rodea al ion metálico. Cuando  $10Dq < kT$ , el átomo se encuentra en configuración alto espín (Figura 2) en condiciones am-

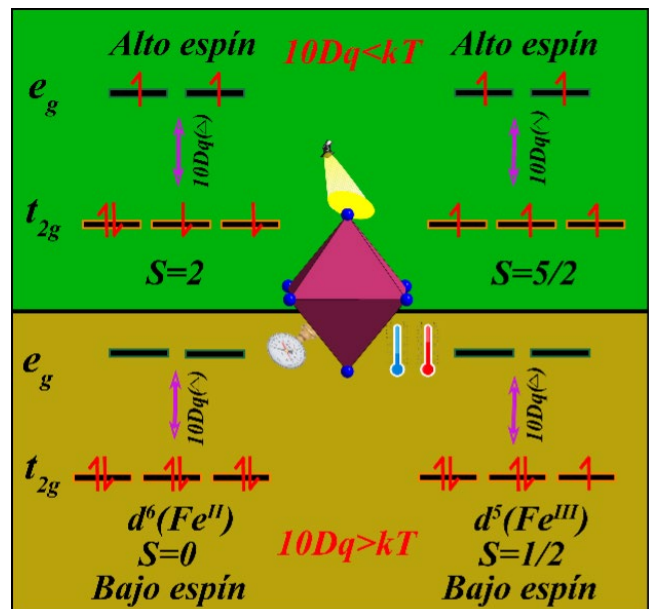


Figura 2. Configuración electrónica en bajo y alto espín para los iones de Fe(II) y Fe(III)

bientales. Por el contrario, si  $10Dq > kT$ , el átomo se encuentra en configuración bajo espín (Figura 2). La brecha de energía entre estos orbitales varía según los ligandos utilizados para generar los compuestos de coordinación de metales de transición [8] [9]. Cuando se logra que  $10Dq \approx kT$ , entonces el compuesto puede pasar de una configuración a otra (transición de espín) mediante la aplicación de un estímulo externo, como temperatura, presión o luz [10][11][12].

Prácticamente no se conocen ejemplos de transición de espín en compuestos con átomos de cromo y manganeso, debido a que tienen un  $10Dq$  muy grande [13]. Los complejos de metales de transición  $3d$  octaédricos que exhiben el fenómeno con mayor frecuencia son los que contienen:  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  y  $Co^{2+}$ . Dichos cationes tienen: 5, 6 y 7 electrones desapareados respectivamente. En todos ellos  $10Dq \approx kT$  por lo que manifiestan transición de espín [7][14].

### Construcción de materiales con SCO

La posibilidad que tiene un material de exhibir el fenómeno de transición de espín depende del entorno de coordinación de los centros metálicos y de los bloques de construcción utilizados. Entre los ligandos más utilizados para la síntesis de materiales con SCO se encuentran la piridina y muchos de sus derivados; las diazinas; los ligandos policíclicos; los ligandos basados en grupos azoles, como los 1,2,4-triazoles sustituidos, etc. (Figura 3). Este tipo de ligandos propicia una brecha energética entre los orbitales  $t_{2g}$  y  $e_g$  del orden de  $kT$ .

Por otra parte, entre los bloques de construcción utilizados, los del tipo cianometalatos han resultado ser excelentes candidatos

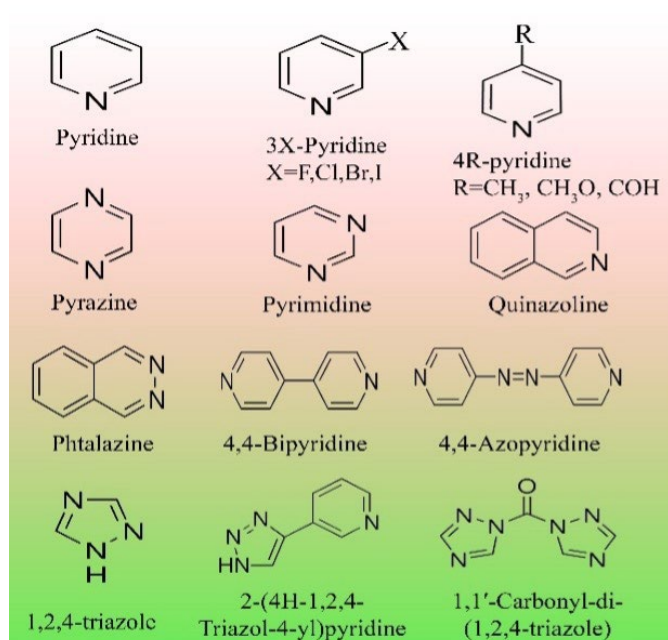


Figura 3. Ligandos orgánicos más utilizados para el desarrollo de materiales con transición de espín

para producir el fenómeno de SCO. El cianuro es el ligando más simple con una fuerte basicidad por lo que puede formar numerosos cianometalatos con diferentes iones de metales de transición que muestran diversas geometrías. Entre los bloques construidos a base de grupos cianos más utilizados se encuentran:  $[M(CN)_2]^{2-}$  (M=Au, Ag, Cu);  $[M(CN)_4]^{2-}$  (M=Ni, Pd, Pt) y  $[Fe(CN)_5NO]^{2-}$  (Figura 4). Mediante la combinación de estos bloques moleculares y los ligandos apropiados se han podido construir una gran variedad de polímeros de coordinación de diferentes dimensionalidades y se ha logrado sintonizar el campo cristalino de manera que pueda ocurrir la transición de espín en el centro metálico a través de una perturbación externa.

### Detección de spin crossover

Las dos consecuencias más importantes de una transición de espín son los cambios en la distancia de enlace entre el metal y el ligando. Los cambios en dichas distancias



surgen del cambio en las ocupaciones relativas de los orbitales  $t_{2g}$  y  $e_g$ , y los cambios en las propiedades magnéticas. El cambio de bajo espín a alto espín provoca un aumento pronunciado en el paramagnetismo del sistema y, por lo tanto, la medición de la magnetización en función de la temperatura es la forma más usada para la detección de la transición de espín, inducida por temperatura [10].

Otra técnica muy útil para caracterizar los complejos con SCO es la Espectroscopía Mössbauer de  $^{57}\text{Fe}$ . La medición de los espectros Mössbauer, para los sistemas de hierro (II) en particular, ofrece un medio más directo para obtener las concentraciones relativas de los estados de espín. Los estados de alto y bajo espín brindan contribuciones separadas y bien definidas a la convolución del espectro, cada estado de espín tiene su propio conjunto de características y de parámetros espectrales de Mössbauer (desplazamiento isomérico y desdoblamiento cuadrupolar) [10].

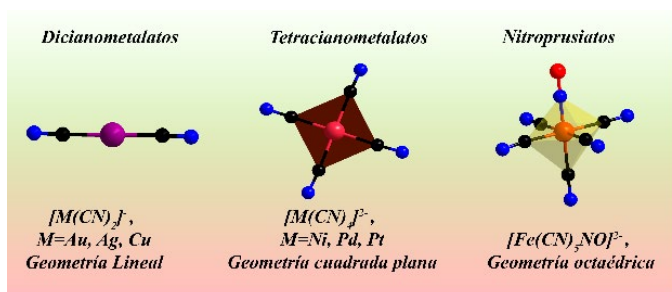


Figura 4. Ejemplos de bloques moleculares y sus geometrías

Las mediciones de capacidad calorífica también son muy útiles, ya que permiten calcular cantidades termodinámicas importantes como los cambios de entalpía y entropía que acompañan a una transición de espín, junto con la temperatura de tran-

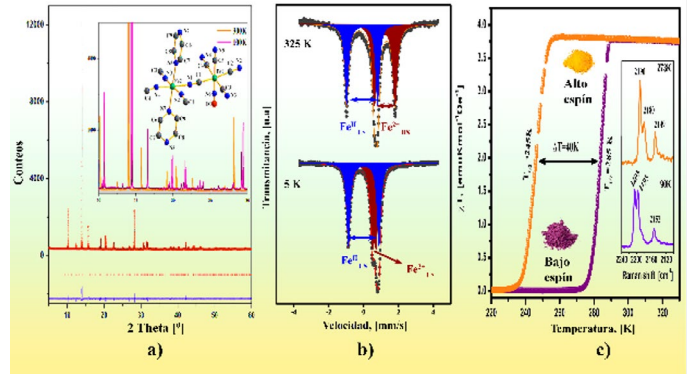


Figura 5. Ejemplos de técnicas aplicadas al material  $\text{Fe}(\text{Pirazina})_5[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}]$ : a) patrones de DRX de alta resolución registrados por encima y por debajo de la transición de espín; b) Espectros de Mössbauer registrados a 325 K (estado de HS) y 5K (estado de LS); c) curva magnética donde se muestra la transición de espín, la transición ocurre de manera abrupta y con una histéresis de 40 K; en el recuadro interior se observan los espectros Raman a 273 K y 90 K; también se muestra el cambio de color asociado a la transición de espín.

sición y el orden de la transición. La transición de espín puede considerarse como una transición de fase asociada a un cambio de energía libre de Gibbs:  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , donde  $\Delta H$  y  $\Delta S$  son los cambios de la entalpía y la entropía durante la transición. En materiales con SCO, el cambio de entalpía es típicamente de 10 a 20  $\text{kJ mol}^{-1}$  y el cambio de entropía es de 50 a 80  $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$  [15]. El SCO inducido por temperatura es, por lo tanto, un proceso gobernado por la entropía. Aproximadamente, el 25 % de la ganancia total de entropía, que acompaña al cambio de bajo espín (LS) a alto espín (HS), surge del cambio en la multiplicidad de espín. El 75 % restante se origina en los cambios en las vibraciones intramoleculares.

Por otra parte, los estudios estructurales (por difracción de rayos X) constituyen un elemento importante en la caracterización de los materiales que exhiben el SCO. La determinación de la estructura cristalina a temperaturas por encima y por debajo de la temperatura de transición proporciona mu-

cha información sobre la naturaleza de los fenómenos de SCO en los sólidos. La aparición de picos característicos diferentes o desplazados en los patrones de difracción en polvo, para las especies de alto y bajo espín, es un indicativo de un cambio de fase dentro del rango de temperatura de la transición de espín.

La Figura 5 muestra algunas de las técnicas mencionadas aplicadas al nitroprusiato de hierro intercalado con pirazina, el cual exhibe el fenómeno de SCO. Este material se preparó utilizando como bloque molecular el ion nitroprusiato  $[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}]^{2-}$  y como ligante orgánico la pirazina.

### Desarrollo de tecnologías y aplicaciones más prometedoras de los materiales con transición de espín

A través de una combinación acertada de los diferentes bloques moleculares de construcción con los ligantes orgánicos apropiados, los materiales con transición de espín se pueden sintetizar y orientar a diversas aplicaciones. El carácter biestable de la transición de espín lo ubica como un candidato excepcional para un gran número de aplicaciones como se muestra en la Figura 6. Sin embargo, para que se utilicen en dispositivos electrónicos, se deben cumplir varios requisitos que determinan el rendimiento de dichos dispositivos. Entre ellos se encuentran: (a) transición abrupta durante el calentamiento y enfriamiento, (b) una amplitud de histéresis térmica, (c) una temperatura de transición alrededor de la temperatura ambiente y (d) un lazo de histéresis estable después de varios ciclos térmicos.

La aparición de histéresis, generalmente acompañada por un cambio de fase sólido-sólido, ha llegado a ser reconocida como

uno de los aspectos más significativos de todo el fenómeno de transición de espín. La histéresis térmica en estos materiales magnéticos los hace adecuados para su uso en dispositivos de almacenamiento de información e interruptores eléctricos [10]. La transición de espín suele venir acompañada de un cambio de color fácilmente detectable. Este cambio resulta de utilidad en el diseño de dispositivos de visualización.

Muchas aplicaciones de los materiales con SCO se basan en sus propiedades electroquímicas en solución, ya que tienen un gran coeficiente de Seebeck ( $S_e$ ) en materiales termoeléctricos [16][17]. Los materiales termoeléctricos basados en semiconductores tienen inconvenientes como un gran costo de producción, procesos de fabricación difíciles y materias primas limitadas. Además, sus dispositivos normalmente funcionan de manera óptima a temperaturas mayores a 200 °C. Como alternativa, se han diseñado materiales termoeléctricos organometálicos con metales manganeso, hierro y cobalto, que exhiben el fenómeno de SCO. Estos materiales tienen un gran rendimiento, ya que muestran un  $S_e$  electroquímico alto a temperaturas inferiores a 200 °C. Esto es posible debido a que la transición de espín de alto a bajo o viceversa del centro metálico provoca una transferencia de electrones, lo que resulta en un mayor cambio en la longitud del enlace metal-ligando. Por lo tanto, se produce un gran cambio de entropía redox ( $\Delta S$ ) y aumenta significativamente el rendimiento de Seebeck, lo que los convierte en materiales prometedores para el desarrollo de celdas termoeléctricas.

Por otro lado, los cambios de fase que ocurren en la transición de espín pueden proporcionar una ventaja adicional en los

dispositivos electrónicos. Por ejemplo, se han diseñado materiales que además de la transición de espín tienen el comportamiento de un cristal líquido [18]. Estos pueden tener una ventaja sobre los materiales cristalinos. Como cristal líquido, el material puede responder con mayor sensibilidad a los estímulos en comparación con la forma cristalina [19]. Esta propiedad es especialmente útil para su explotación en dispositivos del tipo sensores y actuadores.

Varias aplicaciones emergentes y novedosas han sido propuestas para los materiales que exhiben SCO. A continuación, se manifiestan algunos casos de estudio de materiales potencialmente útiles en diversas áreas tecnológicas.

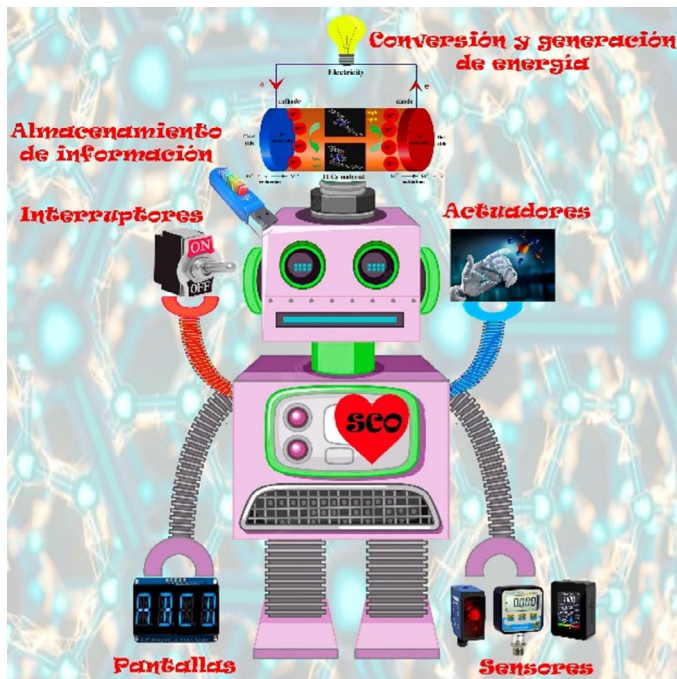


Figura 6. Aplicaciones generales del fenómeno de transición de espín

Dameng Gao y colaboradores reportan la síntesis del material  $[\text{Fe}-(\text{bttmb})_2(\text{SCN})_2]_n$ ,  $\text{bttmb} = 1,3\text{-bis}(1,2,4\text{-triazol-1-ilmetil})\text{-}2,4,6\text{-trimetilbenceno}$ . Este material tiene un comportamiento de transición de espín

a temperatura ambiente con un cambio de color de incoloro a púrpura, que podría ser un candidato ideal como sensor de presión para la producción de “kits de prueba de presión” [20]. Los interruptores y sensores inducidos por presión han atraído una atención significativa en el desarrollo de nuevas tecnologías. Por ejemplo, se han aplicado en el desarrollo de dispositivos para el estudio del suelo, equipos submarinos, detección espacial, entre otros. Para monitorear el cambio de presión en los equipos/espacios correspondientes y para advertir a los operadores sobre las anomalías de presión.

Alejandro Lapresta-Fernández y colaboradores proponen el desarrollo de un sensor de temperatura a base de los cambios de color de un material debido a la transición de espín [21]. Fotografían los cambios de color por la variación térmica utilizando una cámara fotográfica digital convencional. Construyen un conjunto de sensores colorimétricos simples sensibles a los cambios de temperatura mediante la inmovilización de un material con transición de espín en dos matrices poliméricas diferentes, hidrogel de poliuretano D6 y PMMA, que tienen una excelente respuesta temporal de unos pocos segundos. Según el cambio de color de la matriz, la cuantificación de la temperatura se puede lograr fácilmente, incluso a simple vista y la respuesta de la matriz a cada temperatura se representa mediante un patrón único. Estos sensores ópticos se pueden construir en un solo paso obteniendo películas de detección muy uniformes utilizando técnicas de serigrafía [21].

Implementar los materiales con SCO en tecnologías aplicables y funcionales sigue siendo, sin duda alguna, un reto para la comunidad científica internacional. Esto

puede atribuirse principalmente a la naturaleza “delicada” del fenómeno; la cooperatividad expresada a través de diferencias en el tamaño, y la morfología de las partículas y las interacciones electrostáticas que pueden afectar significativamente el fenómeno. Mas allá de desarrollar el material, la incorporación del mismo en polímeros, sin que pierda sus propiedades es de suma importancia para las aplicaciones tecnológicas. En este contexto, se han examinado diferentes tipos de procesos de integración, incluido el recubrimiento por pulverización, la formación de películas delgadas, el electro hilado y la impresión 3D o, incluso, a través de la reacción química del compuesto que presenta la transición de espín con el polímero [22][23][24].

## Bibliografía

- [1] N. Amin et al., “Review of Fe-based spin crossover metal complexes in multiscale device architectures,” *Inorganica Chim. Acta*, p. 121168, 2022.
- [2] L. Cambi and L. Szegő, “Über die magnetische Suszeptibilität der komplexen Verbindungen,” *Berichte der Dtsch. Chem. Gesellschaft (A B Ser.)*, vol. 64, no. 10, pp. 2591–2598, 1931.
- [3] L. Cambi and L. Szegő, “Über die magnetische Suszeptibilität der komplexen Verbindungen (II. Mitteil.),” *Berichte der Dtsch. Chem. Gesellschaft (A B Ser.)*, vol. 66, no. 5, pp. 656–661, 1933.
- [4] L. Cambi and L. Malatesta, “Magnetismus und polymorphie innerer komplexsalze: Eisensalze der dithiocarbamidsäuren,” *Berichte der Dtsch. Chem. Gesellschaft (A B Ser.)*, vol. 70, no. 10, pp. 2067–2078, 1937.
- [5] C. D. Coryell, F. Stitt, and L. Pauling, “The magnetic properties and structure of ferrihemoglobin (methemoglobin) and some of its compounds,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 59, no. 4, pp. 633–642, 1937.
- [6] C. J. Ballhausen, “Introduction to ligand field theory,” McGraw-Hill, 1962.
- [7] H. L. Schläfer and G. Gliemann, *Einführung in die Ligandenfeldtheorie*. Akademische Verlagsgesellschaft, 1967.
- [8] Y. Tanabe and S. Sugano, “On the absorption spectra of complex ions II,” *J. Phys. Soc. Japan*, vol. 9, no. 5, pp. 766–779, 1954.
- [9] A. Hauser, “Ligand field theoretical considerations,” *Spin Crossover Transit. Met. Compd. I*, pp. 49–58, 2004.
- [10] P. Gütllich, H. A. Goodwin, and Y. Garcia, *Spin crossover in transition metal compounds I*, vol. 1. Springer Science & Business Media, 2004.
- [11] P. Gütllich, A. Hauser, and H. Spiering, “Thermal and Optical Switching of Iron(II) Complexes,” *Angew. Chemie Int. Ed. English*, vol. 33, no. 20, pp. 2024–2054, 1994, doi: <https://doi.org/10.1002/anie.199420241>.
- [12] A. Bousseksou, G. Molnár, and G. Matouzenko, “Switching of molecular spin states in inorganic complexes by temperature, pressure, magnetic field and light: towards molecular devices,” *Eur. J. Inorg. Chem.*, vol. 2004, no. 22, pp. 4353–4369, 2004.
- [13] Y. Garcia and P. Gütllich, “Thermal spin crossover in Mn (II), Mn (III), Cr (II) and Co (III) coordination compounds,” *Spin Crossover Transit. Met. Compd. II*, pp. 49–62, 2004.
- [14] J. S. Griffith and L. E. Orgel, “Ligand-field theory,” *Q. Rev. Chem. Soc.*, vol. 11, no. 4, pp. 381–393, 1957.
- [15] R. Bau, P. Gütllich, R. G. Teller, and P. Gütllich, “Spin crossover in iron (II)-complexes,” in *Metal Complexes*, 1981, pp. 83–195.
- [16] Q. Yan, L. Zhou, J.-F. Cheng, Z. Wen, Q. Han, and X.-F. Wang, “High spin-filter efficiency and Seebeck effect through spin-crossover iron–benzene complex,” *J. Chem. Phys.*, vol. 144, no. 15, p. 154304, 2016.
- [17] H. C. Hassan et al., “Ultra-high Seebeck coefficient of a thermal sensor through entropic optimisation of ligand length of Fe (ii) spin-crossover (SCO) materials,” *RSC Adv.*, vol. 11, no. 34, pp. 20970–20982, 2021.
- [18] K. Rajendiran, S. T. Yoganandham, S. Arumugam, D. Arumugam, and K. Thananjeyan, “An overview of liquid crystalline mesophase transition and photophysical properties of ‘f block,’ ‘d block,’ and (SCO) spin-crossover metallomesogens in the optoelectronics,” *J. Mol. Liq.*, vol. 321, p. 114793, 2021.
- [19] M. Seredyuk, A. B. Gaspar, V. Ksenofontov, Y. Galyametdinov, J. Kusz, and P. Gütllich, “Does the Solid–Liquid Crystal Phase Transition Provoke the Spin-State Change in Spin-Crossover Metallomesogens?,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 130, no. 4, pp. 1431–1439, Jan. 2008, doi: 10.1021/ja077265z.
- [20] D. Gao et al., “Pressure Sensor with a Color Change at Room Temperature Based on Spin-Crossover Behavior,” *Inorg. Chem.*, vol. 57, no. 20, pp. 12475–12479, Oct. 2018, doi: 10.1021/acs.inorgchem.8b02408.
- [21] A. Lapresta-Fernández, S. Titos-Padilla, J. M. Herrera, A. Salinas-Castillo, E. Colacio, and L. F. C. Vallvey, “Photographing the synergy between magnetic and colour properties in spin crossover material [Fe (NH<sub>2</sub>trz)<sub>3</sub>](BF<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: A temperature sensor perspective,” *Chem. Commun.*, vol. 49, no. 3, pp. 288–290, 2013.
- [22] A. Hauser, J. Adler, and P. Gütllich, “Light-induced excited spin state trapping (LIESST) in [Fe (2-mephen)<sub>3</sub>]<sub>2+</sub> embedded in polymer matrices,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 152, no. 6, pp. 468–472, 1988.
- [23] L. Salmon and L. Catala, “Spin-crossover nanoparticles and nanocomposite materials,” *Comptes Rendus Chim.*, vol. 21, no. 12, pp. 1230–1269, 2018.
- [24] W. Wang, B. Ji, C. Zhang, and X. Cao, “New spin crossover polymeric composite and another way to describe the result,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 67, pp. 55–59, 2016.



# Fenómenos magnéticos en nanopartículas de materiales antiferromagnéticos

Carlos Luna Criado<sup>1</sup>, Raquel Murillo Ortiz<sup>1</sup>, Diana Castañeda Rodríguez<sup>1</sup>,  
Enrique Díaz Barriga Castro<sup>2</sup>, Raquel Mendoza Reséndez<sup>1</sup>

Raquel Mendoza Reséndez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM)

Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)

Av. Universidad S/N, San Nicolás de los Garza

Nuevo León, 66455, México

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)

Blvd. Enrique Reyna Herмосillo No. 140, Saltillo

Coahuila, 25294, México

[carlos.lunacd@uanl.edu.mx](mailto:carlos.lunacd@uanl.edu.mx)

## Resumen

Los nanomateriales pueden presentar propiedades físicas muy diferentes con respecto a aquellas encontradas en sus análogos macroscópicos. En este trabajo mostraremos cómo las nanopartículas de materiales antiferromagnéticos exhiben comportamientos diferentes al antiferromagnetismo, los cuales tienen un gran potencial para el desarrollo de nuevas tecnologías. Los ejemplos mostrados son resultados originales obtenidos por nuestro grupo de trabajo.

## Introducción

El progreso en la comprensión de los fenómenos magnéticos ha sido fundamental para el desarrollo de diversas ramas de la física, como la física médica, la magnetoelectrónica y la física de partículas. También ha sido crucial en el desarrollo e implementación de tecnologías revolucionarias; los

generadores y motores eléctricos; el almacenamiento magnético de información (como discos duros y cintas magnéticas); los sensores, y los selladores magnéticos son solo algunos ejemplos.

La mayoría de los avances más relevantes alcanzados en la física del magnetismo a partir de la segunda mitad del siglo XX han derivado del estudio de materiales ferromagnéticos o ferrimagnéticos con algunas de sus dimensiones en la escala nanométrica (entre 1 y 100 nm) [1]. No obstante, en las últimas décadas ha ido creciendo el interés por el comportamiento magnético de otros tipos de nanomateriales [2,3].

Los materiales antiferromagnéticos (AF) presentan una fenomenología muy rica y sorprendente cuando presentan tamaños de pocos nanómetros. Algunos ejemplos

ilustrativos son los comportamientos superparamagnético, ferromagnético débil y tipo vidrio de espín encontrados en nanopartículas de materiales AF [4,5]. Por otra parte, el acoplamiento magnético de fases AF con fases ferromagnéticas (FM) o similares, da lugar a efectos interfaciales como la anisotropía de intercambio magnético y la magnetorresistencia gigante, que tienen un gran potencial en el desarrollo de válvulas de espín, sensores y grabación magnética [6-8]. En este artículo se revisan algunos aspectos generales del antiferromagnetismo y algunos comportamientos magnéticos de las nanopartículas AF.

### ¿Qué es el antiferromagnetismo?

El **antiferromagnetismo** es un comportamiento magnético encontrado en ciertos materiales, típicamente óxidos, cloruros o fluoruros de hierro, cobalto, níquel y/o manganeso. El único material constituido por un solo elemento que presenta este tipo de magnetismo es el cromo. El antiferromagnetismo, al igual que el ferrimagnetismo, fue descubierto por Louis Néel (1904-2000), quien fue galardonado en 1970 con el Premio Nobel de Física por estas aportaciones.

Los **materiales antiferromagnéticos** están constituidos por átomos con electrones desapareados cuyos espines les otorgan un momento dipolar magnético neto. Estos momentos magnéticos, en ausencia de un campo, se alinean de forma que los momentos de átomos vecinos apuntan en direcciones opuestas. Este alineamiento, denominado **orden** o **acoplamiento antiferromagnético**, es debido a la **interacción de intercambio** o **canje magnético**. La energía asociada a esta interacción de origen cuántico está descrita por el **operador Hamiltoniano de intercambio de Heisenberg** [9]:

$$\hat{H} = -2J_{ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j, \quad (1)$$

donde  $J_{ij}$  es la constante de canje y  $\hat{S}_i$  y  $\hat{S}_j$  son los operadores espín de los átomos  $i$  y  $j$ , respectivamente. En los materiales ferromagnéticos,  $J_{ij}$  es mayor que cero, por tanto, esta energía se minimiza cuando los espines son paralelos. En los materiales antiferromagnéticos,  $J_{ij}$  es negativa y la interacción de intercambio magnético tiende a alinear antiparalelamente los espines. Consecuentemente, estos materiales presentan dos subredes de espines alineadas antiparalelas. En la figura 1 se muestran tres tipos de configuraciones antiferromagnéticas.

Ante la aplicación de un campo magnético, los momentos atómicos del material AF tienden a orientarse con el campo, imantándose el material con una magnetización proporcional a la intensidad del campo magnético  $H$ . Por consiguiente, la **susceptibilidad magnética**  $\chi$ , que es la relación entre la magnetización  $M$  y el campo  $H$ , es positiva para un material AF. Una vez removido el campo excitador, estos materiales dejan de estar magnetizados; no presentan una magnetización remanente como los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos.

La susceptibilidad magnética de los materiales AF depende de la temperatura [10]. Por debajo de una temperatura crítica, llamada **temperatura de Néel** ( $T_{Néel}$ ), que usualmente es menor que la temperatura ambiente, la susceptibilidad magnética  $\chi$  aumenta según aumenta la temperatura. Esto es debido a que el incremento de la agitación térmica facilita la orientación de los momentos atómicos en la dirección del campo excitador en detrimento de su alineamiento a lo largo de la dirección de ani-

sotropía. No obstante, para temperaturas mayores que  $T_{\text{Néel}}$ ,  $\chi$  cambia su tendencia pasando a ser inversamente proporcional a la temperatura. Este cambio es debido a que a temperaturas  $T > T_{\text{Néel}}$ , la energía térmica, que es proporcional a la temperatura, supera a la energía de la interacción de intercambio magnético y los momentos atómicos pierden su orden antiferromagnético, vibrando de forma independiente muchas veces por segundo. Por tanto, a estas temperaturas el material presenta una respuesta **paramagnética**, y  $\chi$  sigue la ley de Curie-Weiss [10]:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta}, \quad (2)$$

donde  $C$  es la constante de Curie y  $\theta$  es una constante que depende del material y es negativa para materiales AF.

La figura 2 muestra la dependencia térmica de la susceptibilidad en un material AF (en verde), y es comparada con la esperada en otros tipos de magnetismos (diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo).

### Las nanopartículas y los efectos de tamaño finito, de confinamiento cuántico y de superficie

Las partículas nanométricas o nanopartículas son materiales cuyas dimensiones se encuentran dentro de la escala nanométrica. Algunos efectos que no tienen una contribución efectiva en las propiedades de los materiales en bulto emergen y ganan importancia en las nanopartículas según se reduce su tamaño.

Al estudiar partes cada vez más pequeñas de un material hasta llegar a los pocos nanómetros se pueden alcanzar tamaños del

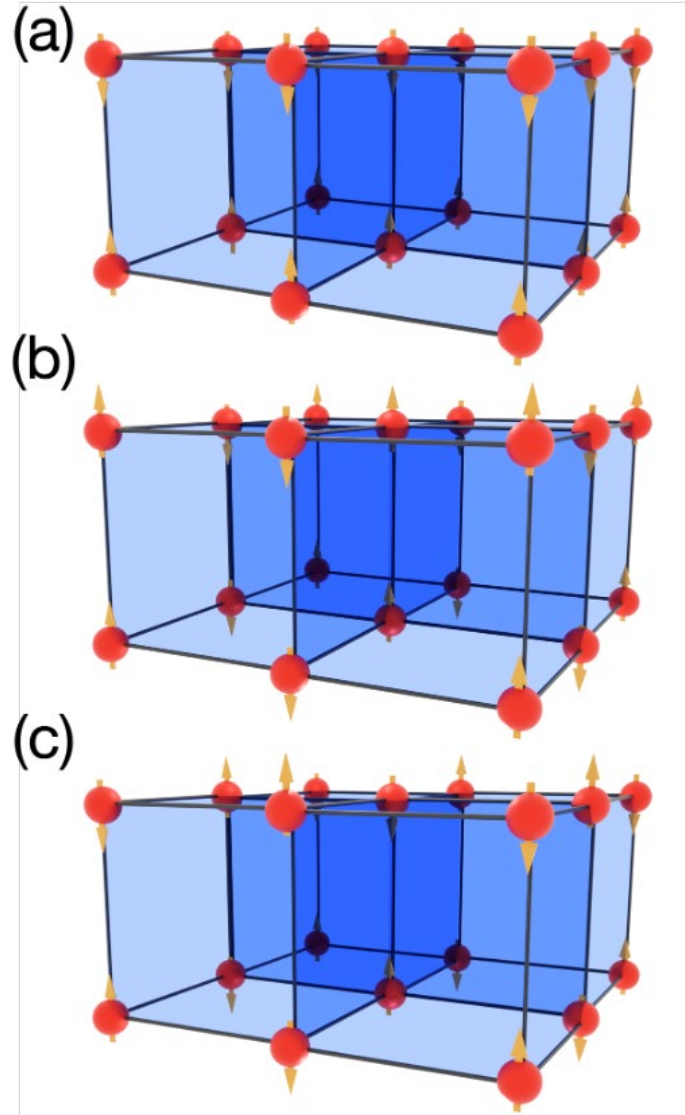


Figura 1. Representación esquemática del orden antiferromagnético en tres configuraciones diferentes de momentos atómicos

orden o menores que una cierta longitud característica asociada a una propiedad física, surgiendo efectos de tamaño finito en esa propiedad, o incluso efectos asociados al confinamiento cuántico de electrones o excitones atrapados en el reducido volumen de la nanopartícula.

Otros efectos que rigen los comportamientos físicos de los nanomateriales son los superficiales. Los átomos en la superficie

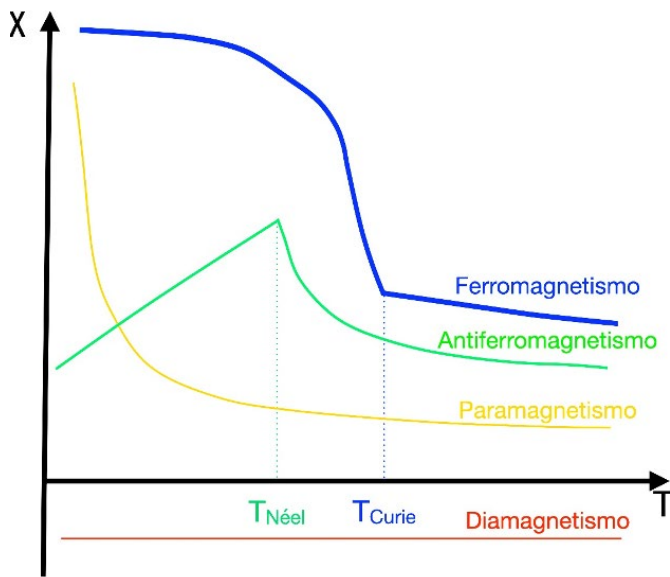


Figura 2. Dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura para los cuatro tipos de magnetismos más comunes: diamagnetismo, paramagnetismo, antiferromagnetismo y ferromagnetismo

de un material tienen menos vecinos que en el volumen (tienen un menor número de coordinación). Por tanto, en la superficie hay menos interacciones entre átomos y las propiedades físicas difieren de las propias del volumen. En un material de dimensiones macroscópicas, la contribución de su superficie a sus propiedades globales es despreciable. No obstante, en las nanopartículas, la relación entre el número de átomos que se encuentran en la superficie y el número total de átomos es significativamente elevado. Así que, para tamaños suficientemente pequeños, las propiedades de la superficie de las nanopartículas predominan sobre las del volumen (figura 3).

### Las nanopartículas de los materiales antiferromagnéticos no son antiferromagnéticas

Los efectos de tamaño y de superficie en las nanoestructuras de materiales AF pueden ser profundos y generar propiedades con fuertes dependencias con el tamaño

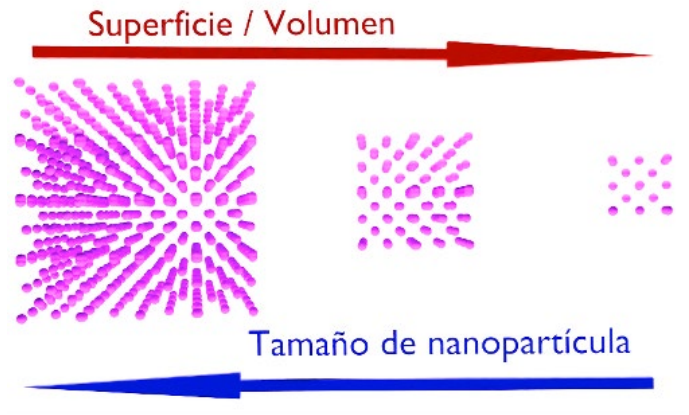


Figura 3. Representación gráfica del efecto del tamaño de partícula en la relación superficie/volumen. Según el tamaño de una nanopartícula disminuye la relación entre el número de átomos en la superficie aumenta en relación con el número total de átomos que constituyen la nanopartícula

y forma de partícula, dando lugar a comportamientos magnéticos muy diferentes al antiferromagnetismo.

Se ha observado que la temperatura de Néel en algunas nanopartículas AF decrece a medida que se reduce el tamaño de nanopartícula. Por ejemplo, Zheng y colaboradores [11] reportaron una temperatura de Néel de 13 K en nanovarillas de diámetros de 2 a 3 nm, y 30 K en nanopartículas de diámetros de 5 nm de CuO, en comparación con la temperatura  $T_{\text{Néel}} = 229$  K del CuO en bulto. Esta disminución de  $T_{\text{Néel}}$  es debida a que según va reduciéndose el tamaño de partícula, menos átomos tiene el material y mayor es la relación de átomos que se encuentran en la superficie. Por tanto, la energía total de la interacción de intercambio en el sistema disminuye con el tamaño de partícula, y la energía térmica supera a esta energía a temperaturas cada vez menores, por tanto,  $T_{\text{Néel}}$  decrece.



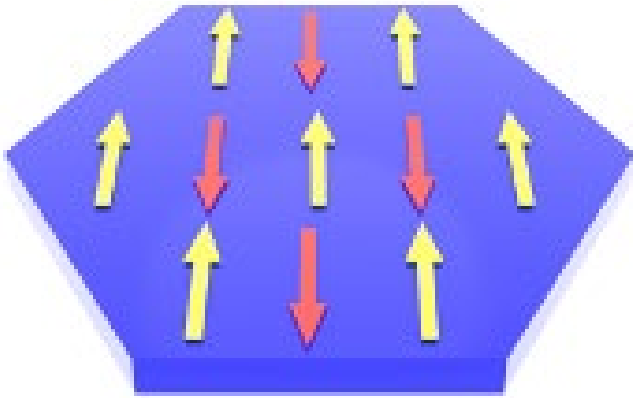


Figura 4. Representación gráfica de la descompensación de espines en una nanopartícula. Se observa que la subred amarilla tiene más espines que la roja

En la superficie de un material AF hay átomos con espines que no llegan a ser compensados por átomos vecinos. En la figura 4 se muestra una representación esquemática de la descompensación de espines producida en la superficie de una nanopartícula. En los materiales de tamaños macroscópicos, la contribución de los espines no compensados en la superficie es ínfima y despreciable, sin embargo, en nanopartículas ultrafinas la mayoría de los átomos se encuentran en la superficie, donde el número de coordinación es menor que en el volumen, y la contribución de los espines no compensados llega a ser predominante. Estos espines proveen a la nanopartícula un momento magnético neto no nulo y un comportamiento similar al ferromagnetismo, presentando las nanopartículas AF histéresis magnética [3]. En la figura 5a se muestra una imagen de microscopía electrónica de transmisión de nanopartículas de akaganeita, un oxihidróxido de hierro antiferromagnético sintetizadas en nuestro laboratorio. Estas nanopartículas presentan histéresis magnética a 2 K (figura 5b). En cambio, presentan una respuesta superparamagnética a 300 K (figura 5b), tal como discutiremos en la siguiente sección.

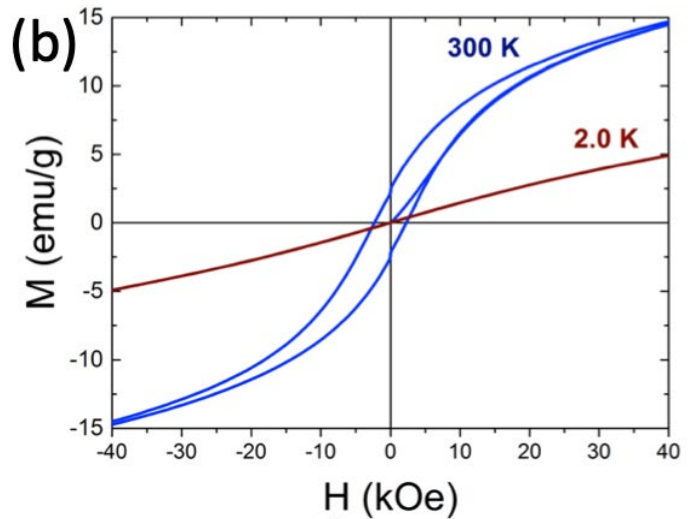
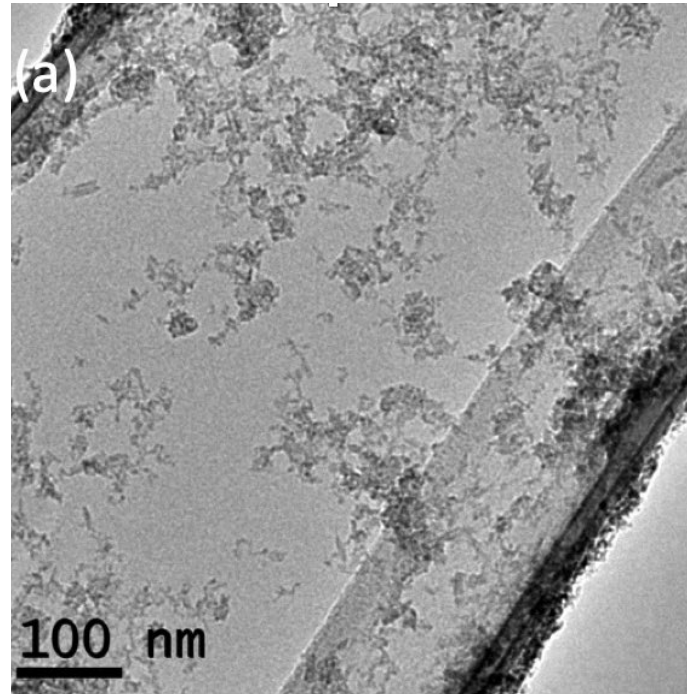


Figura 5a. Imagen de microscopía electrónica de transmisión de nanopartículas de akaganeita. 5b. Curvas de la magnetización de las mismas nanopartículas en función del campo magnético medidas a 300 K y 2 K

### Superparamagnetismo en nanopartículas de materiales antiferromagnéticos

En ausencia de campos magnéticos, el momento magnético neto debido a los espines descompensados en una nanopartícula AF tiende a alinearse en una cierta dirección de fácil magnetización determinada por

las fuentes de anisotropía presentes en el material (debidas a la estructura y textura cristalina, la forma de la nanopartícula y/o a efectos de superficie). En una nanopartícula con un solo eje de anisotropía, este momento tiene dos orientaciones estables asociadas a las dos orientaciones que puede tener a lo largo del eje de anisotropía. Por tanto, podemos asociar a la orientación de la magnetización de la nanopartícula un pozo doble de potencial con una barrera de energía,  $\Delta E$ , representado en la figura 6. A partir de una temperatura crítica, la energía térmica puede superar la barrera de energía, y entonces, los espines no compensados de la nanopartícula oscilan por efectos térmicos entre las dos orientaciones estables, rotando al unísono. En esta situación las nanopartículas AF presentan un comportamiento similar al superparamagnetismo observado en nanopartículas ferromagnéticas y ferrimagnéticas. En el régimen superparamagnético, el material pierde su histéresis magnética. En la figura 5b se observa como la histéresis magnética obtenida a 4 K para las nanopartículas de akaganeita, mencionadas en la sección anterior, se pierde a 300 K.

### Efecto cuántico túnel de la magnetización

De acuerdo con la mecánica cuántica, la función de onda de una partícula puede atravesar una barrera de potencial, aunque la partícula tenga una energía menor que la energía de la barrera de energía. Esto conlleva que exista una cierta probabilidad de que la partícula pueda alcanzar estados que son prohibidos en física clásica [12]. Este es uno de los fenómenos cuánticos más interesantes y sorprendentes, conocido como efecto *cuántico túnel*.

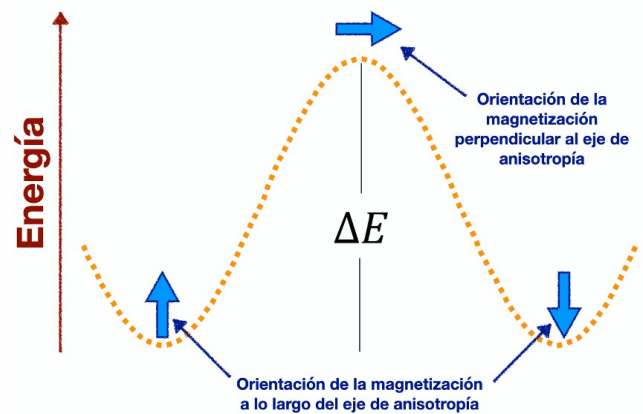


Figura 6. Representación esquemática del pozo doble de potencial y la barrera de energía asociados a las orientaciones de la magnetización de una nanopartícula AF respecto al eje de anisotropía

Las nanopartículas AF tienen una pequeña barrera de energía, por lo que es esperable que, en ausencia de campos magnéticos y a bajas temperaturas (en las que los efectos térmicos son despreciables) la magnetización de nanopartículas AF “salte” espontáneamente de un estado estable al otro por el efecto túnel. Algunos trabajos en las últimas décadas han encontrado indicios de este efecto [13].

### Anisotropía de intercambio magnético

En 1956, Meiklejohn y Bean descubrieron que las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos (FM) cambian drásticamente al estar en contacto con los materiales antiferromagnéticos, después de realizar tratamientos térmicos en presencia de un campo magnético intenso. Esto induce un nuevo tipo de anisotropía magnética originada por la interacción de canje en la interfase FM/AF, denominada *anisotropía de canje* [7,14,15].

La anisotropía de canje puede inducirse cuando el material (bifásico o multifásico) es enfriado desde una temperatura superior a la temperatura de Néel de la fase AF, en presencia de un campo magnético intenso, a una temperatura menor que  $T_{\text{Néel}}$ . Generalmente es necesario que la temperatura de Curie de la fase FM,  $T_{\text{Curie}}$ , sea mayor que  $T_{\text{Néel}}$  (figura 7a) [7]. Por tanto, si la anisotropía magnética de la fase AF es suficientemente grande y la muestra es sometida a un proceso de enfriamiento apropiado, la fase AF ejercerá un torque extra microscópico sobre los espines de la fase FM en la interfase magnética. Por consiguiente, el acoplo FM/AF induce la anisotropía de canje. Algunas consecuencias de esta acción de giro son el aumento del campo coercitivo y el desplazamiento de los ciclos de histéresis a lo largo del eje del campo en el sentido opuesto al campo aplicado en el proceso de enfriamiento, lo que indica que la energía requerida para invertir la imanación no es la misma cuando se pasa de un estado de saturación al otro, y viceversa.

Este tipo de anisotropía también puede inducirse en nanopartículas AF puras debido a que, como hemos mencionado anteriormente, la superficie de estas nanoestructuras presenta un comportamiento débilmente ferromagnético a baja temperatura debido a los espines no compensados, mientras que su núcleo tiene las propiedades AF de volumen.

En la figura 8 se puede comparar el ciclo de histéresis de nanopartículas de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) medido a 2 K enfriando la muestra sin campos magnéticos (ESC), con el ciclo medido a la misma temperatura medido después de enfriar la muestra con un campo (EC) de +6 T. Este último aparece

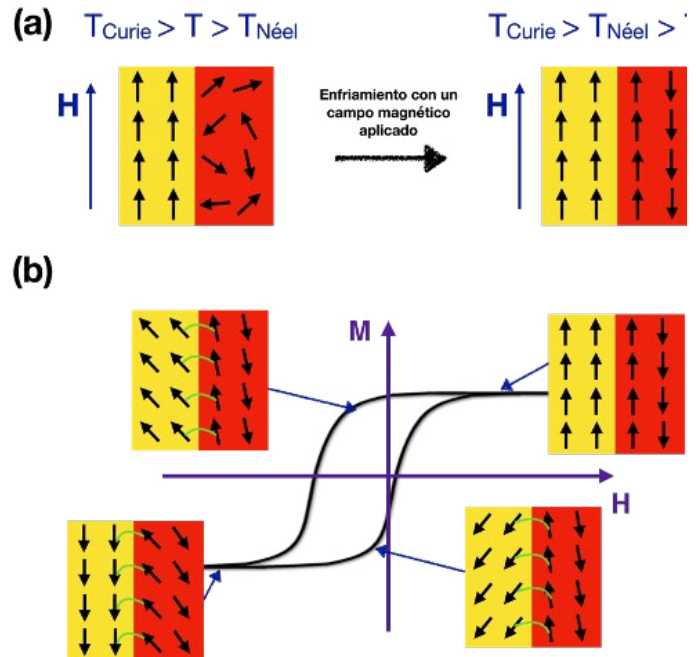


Figura 7a. Representación gráfica del acoplamiento magnético en la interfase FM/AF producida durante un proceso de enfriamiento con campo desde una temperatura mayor que  $T_{\text{Néel}}$  hasta una temperatura menor que  $T_{\text{Néel}}$ . 7b. Representación esquemática del acoplamiento magnético de una fase AF (en rojo) y una FM (en amarilla), y el efecto de este acoplamiento en el ciclo de histéresis del material

desplazado hacia los campos negativos con una mayor coercitividad, debido al acoplamiento entre los momentos magnéticos no compensados en la superficie con los momentos atómicos en el núcleo de la nanopartícula.

## Conclusiones

El estudio de los nanomateriales AF nos ofrece la oportunidad de encontrar nuevos fenómenos magnéticos, encontrándose su esclarecimiento en las fronteras del conocimiento actual. De este modo, estos materiales son sistemas ideales para poner a prueba nuestro conocimiento acerca de la física del magnetismo y poder hallar nuevas propiedades físicas que pudieran ser la base de nuevas áreas de investigación y tecnologías.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por su apoyo dentro del Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT). R. Murillo-Ortiz agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México su apoyo con una beca postdoctoral dentro del programa Estancias Posdoctorales por México 2022.

## Referencias

- [1] Hou, Y., Sellmyer, D. J. (Eds.). (2017). *Magnetic nanomaterials: Fundamentals, synthesis and applications*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-3-527-34134-4.
- [2] Crespo, P., Litrán, R., Rojas, T. C., Multigner, M., De la Fuente, J. M., Sánchez-López, J. C., García, M. A., Hernando, A., Penadés, S., Fernández, A. (2004). Permanent magnetism, magnetic anisotropy, and hysteresis of thiol-capped gold nanoparticles. *Physical review letters*, 93(8), 087204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.087204>
- [3] Luna, C., Ilyn, M., Vega, V., Prida, V. M., González, J., & Mendoza-Reséndez, R. (2014). Size distribution and frustrated antiferromagnetic coupling effects on the magnetic behavior of ultrafine akaganéite ( $\square$ -FeOOH) nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(36), 21128-21139. <https://doi.org/10.1021/jp5048634>.
- [4] Kodama, R. H., Makhlof, S. A., Berkowitz, A. E. (1997). Finite size effects in antiferromagnetic NiO nanoparticles. *Physical Review Letters*, 79(7), 1393. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.1393>.
- [5] Tiwari, S. D., Rajeev, K. P. (2005). Signatures of spin-glass freezing in NiO nanoparticles. *Physical Review B*, 72(10), 104433. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.104433>.
- [6] Skumryev, V., Stoyanov, S., Zhang, Y., Hadjipanayis, G., Givord, D., Nogués, J. (2003). Beating the superparamagnetic limit with exchange bias. *Nature*, 423(6942), 850-853. <https://doi.org/10.1038/nature01687>.
- [7] Nogués, J., Sort, J., Langlais, V., Skumryev, V., Suriñach, S., Muñoz, J. S., Baró, M. D. (2005). Exchange bias in nanostructures. *Physics reports*, 422(3), 65-117. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.08.004>.
- [8] Bhanuchandar, S., Vinothkumar, G., Arunkumar, P., Sribalaji, M., Keshri, A. K., Babu, K. S. (2019). Controlled growth of Ni/NiO composite nanoparticles and its influence on exchange anisotropy and spin glass features. *Journal of Alloys and Compounds*, 780, 256-265. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.330>.
- [9] Mohn, P. (2005). *Magnetism in the Solid State: An Introduction*: 134 (1er ed. 2003. Corr. 2a impresión 2005). Springer. ISBN: 978-3-540-29384-2.
- [10] Cullity, B. D. and Graham, C. D. (2010). *Introduction to Magnetic Materials (English Edition)* (2nd ed.). Wiley IEEE Press. ISBN: 978-0471477419.

- [11] Zheng, X. G., Xu, C. N., Nishikubo, K., Nishiyama, K., Higemoto, W., Moon, W. J., Tanaka, E., Otabe, E. S. (2005). Finite-size effect on Néel temperature in antiferromagnetic nanoparticles. *Physical Review B*, 72(1). <https://doi.org/10.1103/physrevb.72.014464>.
- [12] Eisberg, R., & Resnick, R. (1994). *Física Cuántica*, Limusa. ISBN: 968-18-0419-8.
- [13] Barbara, B., Sampaio, L. C., Wegrowe, J. E., Ratnam, B. A., Marchand, A., Paulsen, C., Novak, M. A., Tholence, J. L., Uehara, M., Fruchart, D. (1993). Quantum tunneling in magnetic systems of various sizes. *Journal of applied physics*, 73(10), 6703-6708.
- [14] Meiklejohn, W. H., & Bean, C. P. (1956). New magnetic anisotropy. *Physical review*, 102(5), 1413.
- [15] Meiklejohn, W. H., & Bean, C. P. (1957). New magnetic anisotropy. *Physical Review*, 105(3), 904.



# Uso de sustancias activas de medicamentos derivados del 2-mercaptobenzimidazol como inhibidores de corrosión en la industria petrolera

Araceli Espinoza Vazquez<sup>1\*</sup>, Ricardo Orozco Cruz<sup>1</sup>, Guillermo E. Negrón Silva<sup>2</sup>, Manuel Palomar Pardavé<sup>3</sup>, Ricardo Galván Martínez<sup>1</sup>, Ignacio A. Figueroa Vargas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Unidad anticorrosión, Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. S. Juan Pablo II S/N, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94294, México

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200, México

<sup>3</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200, México

<sup>4</sup> Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, C.P. 04510, México

[araespinoza@uv.mx](mailto:araespinoza@uv.mx)\*

## Resumen

Se realizaron evaluaciones electroquímicas de derivados del 2-mercaptoimidazol y de sustancias activas de medicamentos (como los supresores de secreción gástrica) como inhibidores de corrosión en condiciones estáticas e hidrodinámicas del acero API 5L X52 inmerso en medio acuoso de HCl 1 M mediante las técnicas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE), obteniéndose la mejor eficiencia (de ~90 %) desde bajas concentraciones y en condiciones estáticas.

Se detectó mediante un electrodo de disco rotatorio que a 40 rpm se mejora ligeramente la protección contra la corrosión.

Al aumentar las revoluciones por minuto, de 100 y 1000 rpm, la eficiencia de inhibición tendió a disminuir (como resultado del proceso de adsorción-desorción de las moléculas orgánicas por la velocidad de rotación). Se demostró que el pantoprazol se mantiene activo y protege al acero hasta tiempos de inmersión cercanos a las 700 horas. Finalmente, los supresores de la secreción gástrica presentaron un mecanismo de adsorción de fisorción sobre la superficie metálica empleando la isoterma de Langmuir.

## Palabras Clave:

EIE, inhibidores, pantoprazol, API 5L X52.

## Antecedentes

La corrosión es una condición que afecta a casi todas las etapas de la industria petroquímica [1]. Está presente en las etapas de perforación, producción, transporte y refinación, y en cada una de ellas las causas de corrosión son diferentes. Según un reciente informe de la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (AMPP, formalmente NACE), en la industria petrolera la corrosión es la causa de más del 25 % de las fallas. En el mapa de la Figura 1 se muestra la distribución actual de las refinerías, poliductos, terminales de almacenamiento y rutas marítimas para el transporte de petrolíferos en México. Las regiones fueron definidas por Sener, con base en la logística de suministro con el fin de determinar los días necesarios para su reabastecimiento [2].



Figura 1. Infraestructura Actual del Sistema Nacional de Logística de Petróleos Mexicanos. ([https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5507473](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5507473), 2022)

Entre las alternativas más empleadas para solucionar este problema se encuentra el uso de inhibidores de la corrosión [3]. Estas son sustancias que, agregadas en pequeñas concentraciones en el medio corrosivo, disminuyen o previenen la reacción entre el metal y el medio, produciendo un cierto nivel de protección. Si los inhibidores de

la corrosión son eficientes, su naturaleza química los hace persistentes, poco o nula-mente degradables, y en la mayoría de los casos altamente tóxicos [4,5]. El amplio y prolongado empleo de estos inhibidores ha tenido un impacto ambiental, por lo cual, en la última década, se ha intensificado la búsqueda de nuevas alternativas (como aquellos de origen natural y algunos otros de síntesis. Figura 2) [6].



Figura 2. Inhibidores de corrosión empleados en la actualidad

Estos se pueden utilizar en diferentes concentraciones, que generalmente oscilan entre los 10 mg/L y 50 mg/L, según la norma NRF-005-PEMEX- 2009 [7].

El campo de desarrollo de inhibidores de la corrosión se encuentra en una etapa de evaluación de diferentes compuestos heterocíclicos nitrogenados, con fuertes características de inhibición de la corrosión, los cuales prometen ser excelente materia prima para el desarrollo de inhibidores [8]. Los compuestos nitrogenados son los más utilizados como inhibidores, ya que han evolucionado en el aspecto de eficiencia y toxicidad [9].

Previamente, se ha demostrado que el 2-mercaptobenzimidazol (2-MBI) se comporta como un eficiente inhibidor orgánico de la corrosión del acero tipo API 5L X52 [10], tanto con ácido clorhídrico como con ácido sulfúrico. Los derivados del 2-MBI portadores del sustituyente activante metilo (que enriquece la densidad electrónica del anillo aromático) y del sustituyente desactivante nitro (que empobrece la densidad electrónica del benceno, por efecto de resonancia) son menos eficientes, en ese orden (véase la Figura 4).

En este trabajo de divulgación se presentan algunos de los resultados obtenidos con inhibidores de corrosión derivados del 2-MI, que son sustancias activas de medicamentos comerciales muy conocidos en medios corrosivos como HCl, así como en condiciones hidrodinámicas y efecto del tiempo de inmersión.

## Desarrollo experimental

Una vez planteado el inhibidor de corrosión a evaluar se sigue la metodología de la figura 3 de manera general, que involucra la preparación superficial del metal de estudio, las disoluciones de inhibidor (diferentes concentraciones), el montaje de la celda electroquímica de tres electrodos y las pruebas electroquímicas.

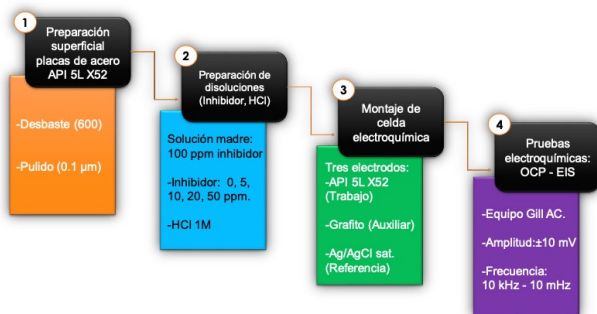


Figura 3. Desarrollo experimental para la evaluación electroquímica

## Resultados y discusión

### a) Inhibición de corrosión en condiciones estáticas

En una primera etapa se probaron compuestos de origen comercial (marca Aldrich), enlistados en la Figura 4. Cabe mencionar que estos compuestos presentan heteroátomos (como N, O y S), mismos que los hicieron buenos candidatos para proteger la superficie del acero API 5L X65 en medio ácido [11].

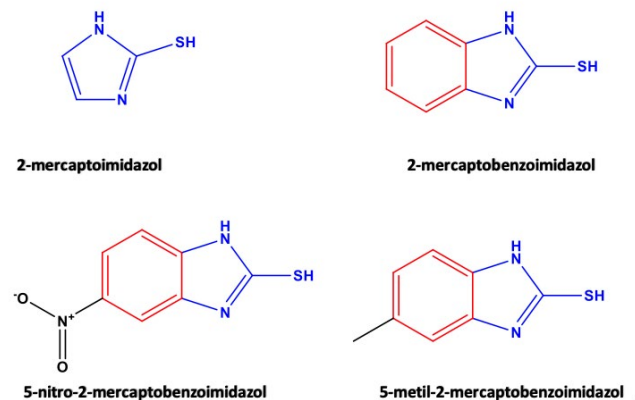


Figura 4. Inhibidores de corrosión derivados del 2-mercaptimidazol

Para calcular la eficiencia de inhibición (% IE) se utilizó la ecuación (1) [12]:

$$\% IE = \frac{\left(\frac{1}{R_p}\right)_{inhibidor} - \left(\frac{1}{R_p}\right)_{blanco}}{\left(\frac{1}{R_p}\right)_{inhibidor}} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $R_p$  es la resistencia a la polarización con y sin inhibidor ( $R_p = R_{tc} + R_{mol}$ ).

Por otro lado, en la Figura 5 se muestra que los mejores resultados los presentan los compuestos 2-MI y 2-MBI, a bajas concentraciones. Esto cumple con la norma de referencias NRF-005-2009, alcanzan un 90 % y, por lo tanto, pueden ser utilizados en la industria petrolera.

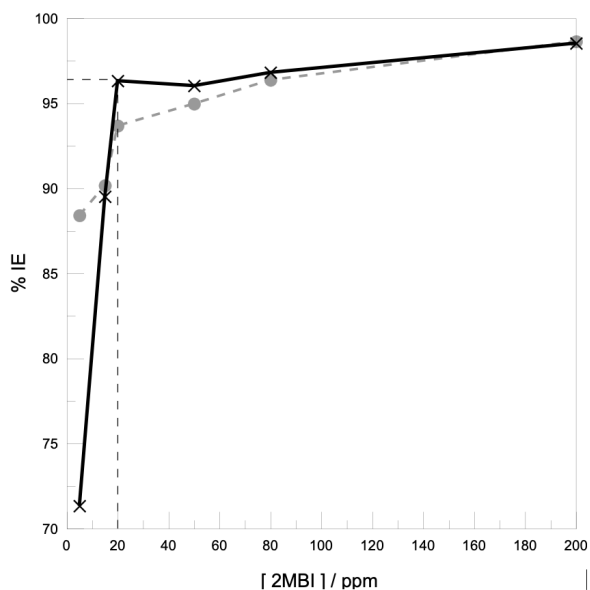


Figura 5. Variación de la eficiencia de inhibición del 2-mercaptoimidazol y 2-mercaptobenzimidazol

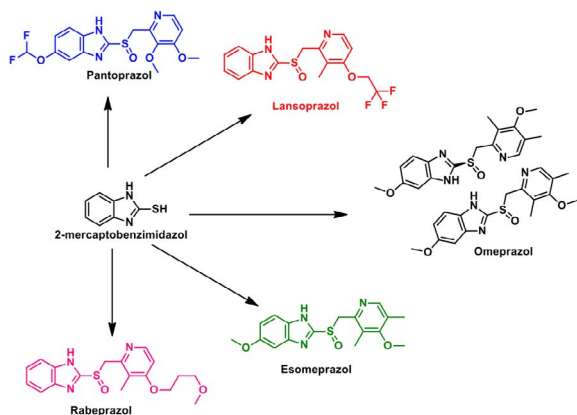


Figura 6. Compuestos orgánicos derivados del 2-mercaptobenzimidazol evaluados en el acero API 5L X52

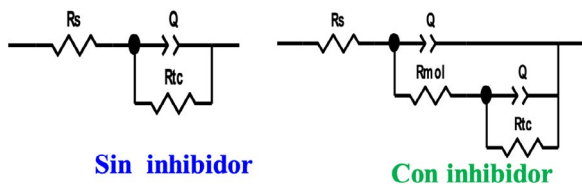


Figura 7. Circuitos eléctricos equivalentes utilizados para la obtención de parámetros electroquímicos

b) Inhibición de corrosión en flujo Laminar  
Asumiendo que la estructura química del mercaptobenzimidazol es la responsable de la inhibición de la corrosión, podemos mencionar que esta se encuentra presente en los fármacos inhibidores de la bomba de protones: Rabeprazol, Omeprazol, Pantoprazol y Lansoprazol, Figura 6. En general, esta familia de compuestos es utilizada en la prevención y tratamiento de enfermedades relacionadas con el ácido gástrico y el síndrome de Zollinger-Ellison [13,14].

Las propiedades de inhibición de la corrosión de los compuestos orgánicos, resumidos en la Figura 4, fueron estudiados mediante espectroscopia de impedancia electroquímica y fueron analizados mediante los circuitos eléctricos correspondientes (Figura 7).

Si comparamos el fármaco con su correspondiente sustancia activa (Figura 8), el primero (desde una concentración de 10 ppm) alcanzó una buena IE (%) y no muestra cambios cuando se incrementa la concentración hasta 100 ppm. Pudiéndose atribuir a que, en el caso de este compuesto, el recubrimiento o capsula entérica que contiene el fármaco está actuando en el efecto de inhibir la corrosión.

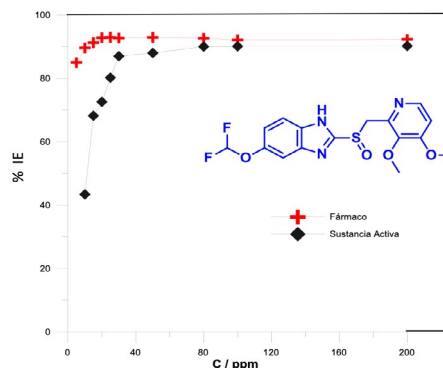


Figura 8. Variación de la eficiencia de inhibición en función de la concentración de Pantoprazol, en HCl 1 M en condiciones estáticas



**c) Evaluación de la Cinética de inhibición de la corrosión de los IBP**

Tras haber realizado el estudio de barrido de concentraciones y el de la efectividad que demuestran estos inhibidores orgánicos, es interesante evaluarlos con respecto al tiempo de inmersión. Los resultados obtenidos demuestran que la resistencia a la transferencia de carga se mantiene prácticamente constante para el Pantoprazol (Figura 9). Sin embargo, cuando se comparó la eficiencia de inhibición con respecto al tiempo de inmersión, es muy notable observar como el Omeprazol y el Pantoprazol tuvieron un comportamiento similar, siendo efectivos hasta por 24 días. Caso contrario ocurre con el Lansoprazol, que empieza a disminuir su EI, pero presentan un comportamiento aceptable hasta los 14 días. En el caso del Rabeprazol, este pierde su efectividad después de 168 horas de inmersión (hasta sus valores iniciales).

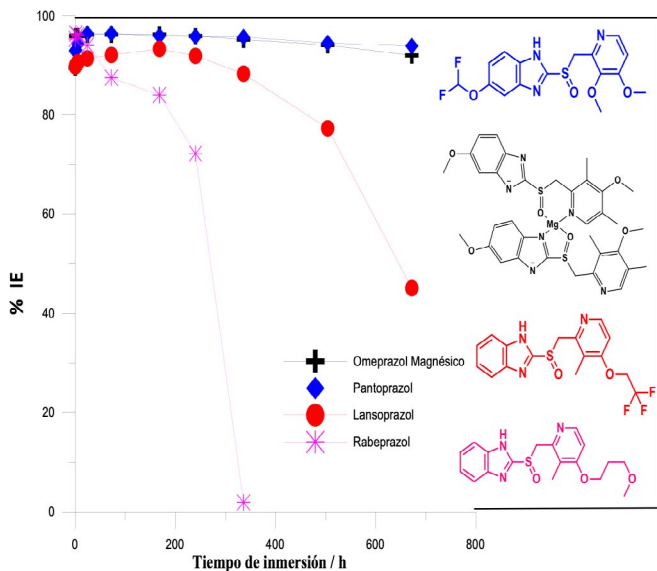


Figura 9. Comparativo de la eficiencia de inhibición de los IBP en HCl 1M en función del tiempo de inmersión

**d) Efecto de la concentración de Pantoprazol y las condiciones hidrodinámicas**

El estudio de barrido de concentraciones de los diferentes medicamentos mostró que el mejor inhibidor fue el Pantoprazol en condiciones estáticas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos empleando este mismo compuesto orgánico a diferentes velocidades de rotación, para observar la forma en que el compuesto afecta el mecanismo de corrosión [15].

Cuando se hace un comparativo de las diferentes velocidades de rotación a una concentración de 25 ppm (Figura 10), se observa que las mejores condiciones de protección contra la corrosión son de 40 rpm, seguido de 100 rpm. En cambio, cuando incrementamos notablemente la velocidad de rotación (1000 rpm) se observó que el inhibidor no tiene mucho efecto en la inhibición de la corrosión (Figura 10) ya que, aparentemente, esta dinámica de flujo hace que sea más difícil el transporte del inhibidor y que se adsorba en la superficie del metal [16].

**e) Análisis termodinámico de los supresores de la secreción gástrica**

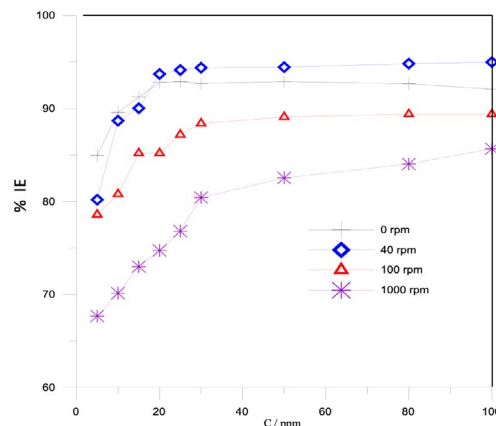


Figura 10. Variación de la Eficiencia de Inhibición en función de la concentración, cambiando la velocidad de rotación (rpm)

Las isothermas de adsorción proporcionan información básica entre los compuestos orgánicos estudiados (inhibidor) y la superficie metálica (ecuación 2-4). Existen dos tipos de adsorción que describen la interacción de los compuestos orgánicos, estos son, la fisisorción o quimisorción. En el proceso de fisisorción, el tipo de interacción entre las moléculas del inhibidor adsorbido y la superficie metálica es de van der Waals, con valores por debajo de  $-20 \text{ kJ/mol}$ . Para el proceso de quimisorción se ven implicados los fenómenos de compartir las cargas y coordinar la formación del enlace entre la superficie del acero y las moléculas orgánicas [17].

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{k_{ads}} + C \quad \text{Modelo de Langmuir} \quad (2)$$

$$C^{1/n} K_{ads} = \theta \quad \text{Modelo de Freundlich} \quad (3)$$

$$C k_{ads} = \left( \frac{\theta}{1-\theta} \right) e^{f\theta} \quad \text{Modelo de Frumkin} \quad (4)$$

En la Figura 11 se muestra el ajuste correspondiente de cada uno de los compuestos inhibidores de la bomba de protones o supresores de la secreción gástrica, observándose un buen ajuste con el modelo de la ecuación 2.

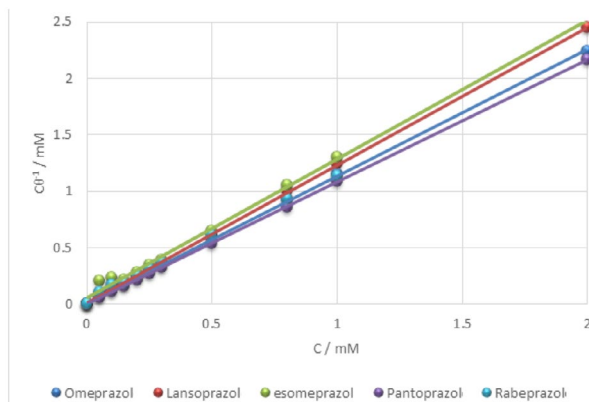


Figura 11. Análisis termodinámico de los supresores de la secreción gástrica en HCl 1M

El negativo del  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  del proceso de adsorción de las moléculas orgánicas en el acero denota un proceso espontáneo. Los valores de la Tabla 1 de la energía de adsorción por debajo de  $-20 \text{ kJ mol}^{-1}$  son generalmente atribuidos a un proceso de fisisorción [18].

| Inhibidor   | $\Delta G^{\circ}_{ads}$ (kJ/mol) | $R^2$  |
|-------------|-----------------------------------|--------|
| Omeprazol   | -8.95                             | 0.9998 |
| Esomeprazol | -6.79                             | 0.9986 |
| Pantoprazol | -15.09                            | 0.9999 |
| Lansoprazol | -9.11                             | 0.9999 |
| Rabeprazol  | -7.44                             | 0.9997 |

Tabla 1. Parámetros de adsorción calculados con el modelo de Langmuir

## Conclusiones

La actividad como inhibidor de la corrosión del Pantoprazol se puede atribuir a la presencia del sistema 2-mercaptoimidazol en su estructura. La cápsula entérica ejerce un efecto sinérgico en la actividad de inhibir la corrosión con ácido clorhídrico del acero tipo API 5L X52.

Las moléculas fluoradas son más eficientes como inhibidoras de la corrosión (Pantoprazol, con un 92 % y Lansoprazol, con un 83 %). Especialmente si el flúor se encuentra en el anillo de benceno del sistema 2-mercaptobencimidazol oxidado, en lugar del anillo de piridina.

El análisis termodinámico nos demuestra que el proceso que se lleva a cabo es el de fisisorción sobre la superficie metálica y la cinética de inhibición mostró que los mejores inhibidores son el Omeprazol magnésico como sustancia activa y el Pantoprazol en su presentación como fármaco, a tiempos largos de exposición.

Finalmente, la formación de la película inhibidora es favorecida a 40 rpm, debido a la velocidad de rotación. El aumento del valor de la impedancia ( $Z_{real}$ ) es asociado a un incremento en la convección del inhibidor que va de la mayor parte de la solución hacia la superficie del electrodo.

## Referencias

- [1] P. Morales, G. Negrón, M. Romero, C. Ángeles, M. Palomar, Corrosion inhibition of pipeline steel grade API 5L X52 immersed in a 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aqueous solution using heterocyclic organic molecules, *Electrochim. Acta* 49 (2004) 4733-4741.
- [2] R. Álvarez-Bustamante, G. Negrón-Silva, M. Abreu-Quijano, H. Herrera-Hernández, M. Romero-Romo, A. Cuán, M. Palomar-Pardavé, Electrochemical study of 2-mercaptoimidazole as a novel corrosion inhibitor for steels Electrochemical study of 2-mercaptoimidazole as a novel corrosion inhibitor for steel, *Electrochim. Acta* 54 (2009) 5393-5399.
- [3] [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5507473](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5507473). (19 de 10 de 2022).
- [4] R. Solmaz G. Kardaş, M. Çulha, B. Yazıcı, M. Erbil, Investigation of adsorption and inhibitive effect of 2-mercaptothiazoline on corrosion of mild steel in hydrochloric acid media, *Electrochim. Acta* 53 (2008) 5941-5952.
- [5] J. Aljourani, K. Raeissi, M.A. Golozar, Benzimidazole and its derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl solution, *Corros. Sci.* 51 (2009) 1836-1843.
- [6] M. Dame, M. Benmessaoud, S. Zehra, .Kaya, Hassane Lgaz, A. Molhi, N. Labjar, S. El Hajjaji, Awad A. Alrashdi, Han-Seung Lee, Experimental and theoretical explorations of S-alkylated mercaptobenzimidazole derivatives for use as corrosion inhibitors for carbon steel in HCl, *J. Mol. Liq.* 331 (2021) 115708.
- [7] W. Li, T. Ma, B. Tan, S. Zhang, M. Yan, J. Ji, F. Yuan Wang, H. Du, X. Wang, The effect of structural properties of benzo derivative on the inhibition performance for copper corrosion in alkaline medium: Experimental and theoretical investigations, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 649, 20 (2022) 129531
- [8] L. Huang, Q. Zhao, H. Li, J. Wang, X. Wang, Y. Wu, Investigation of adsorption and corrosion inhibition property of Hyperoside as a novel corrosion inhibitor for Q235 steel in HCl medium, *J. Mol. Liq.* 364 (2022) 120009.
- [9] X. Sun, Y. Qiang, B. Hou, H. Zhu, H. Tian, Cabbage extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for X70 steel in hydrochloric acid medium, *J. Mol. Liq.*, 362, (2022), 119733.
- [10] A. Espinoza-Vázquez, G. Negrón-Silva, M. Palomar-Pardavé, M. Romero-Romo, I. Rodríguez, H. Herrera-Hernández, Electrochemical impedance Spectroscopy analysis of 2-Mercaptobenzimidazole (2-MBI) as corrosion inhibitor in HCl 1M, *ECS Transactions*, 20 (2009) 543-553.
- [11] M. Rbaa, M. Ouakki, M. Galai, A. Berisha, B. Lakhrissi, C. Jama, A. Zarrouk, Simple preparation and characterization of novel 8-Hydroxyquinoline derivatives as effective acid corrosion inhibitor for mild steel: Experimental and theoretical studies. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 602 (2020) 125094.
- [12] A. Espinoza-Vázquez, M.A. Cervantes-Robles, G. E. Negrón-Silva, F.J. Rodríguez-Gómez, M. Palomar-Pardavé, L. Lomas-Romero. D. Ángeles-Beltrán, D. Pérez-Martínez, Carbohydrates as Corrosion Inhibitors of API 5L X70 Steel Immersed in Acid Medium, *Electrochem. Sci.* 14 (2019) 9206-9220.
- [13] A. Khadom, A. Musa, A. Kadhum, A. Mohamad, M. Takriff, Adsorption Kinetics of 4-Amino-5-Phenyl-4H-1, 2, 4-Triazole-3-Thiol on Mild Steel Surface, *Portug. Electrochim. Acta* 28(4) (2010) 221-230.
- [14] A. Musa, A. Kadhum, A. Mohamad, M. Takriff, A. Razak, S. Kartom, On the inhibition of mild steel corrosion by 4-amino-5-phenyl-4H-1, 2,4-triazole-3-thiol, *Corros. Sci.* 52 (2010) 526-533.
- [15] A. Espinoza-Vázquez, G.E. Negrón-Silva, D. Angeles-Beltrán, H. Herrera-Hernández, M. Romero-Romo, M. Palomar-Pardavé, EIS Evaluation of Pantoprazole as Corrosion Inhibitor for Mild Steel Immersed in HCl 1 M. Effect of [Pantoprazole], Hydrodynamic Conditions, Temperature and Immersion Time, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9 (2014) 493-509.
- [16] A. Sorkh Kaman, Z. Mehdi Shahidi, Z. Maryam Kazemipou, Corrosion protection of carbon steel in acidic media by expired bupropion drug; experimental and theoretical study, *J. Indian Chem. Soc.*, 99 (7), (2022) 100522.
- [17] H. Abdulkareem, M. Kadhem, M. Mustafa, M. Kadhem, Anees A. Khadom, Corrosion inhibition behavior of expired diclofenac Sodium drug for Al 6061 alloy in aqueous media: Electrochemical, morphological, and theoretical investigations, *J. Mol. Liq.*, 343, (2021), 117656.
- [18] M. Ontiveros-Rosales, A. Espinoza-Vázquez, F.J. Rodríguez Gómez, B.A. Acosta-García, M. Castro, Imidazolates of 1-butyl-3-ethyl imidazole as corrosion inhibitor on API 5L X52 steel in NaCl saturated with CO<sub>2</sub>, *J. Mol. Liq.*, 363, (2022), 119826.



# Micro y nanoplásticos: los que no salen en la foto

**Ana Martínez Vázquez**

Departamento de Materiales de Baja Dimensionalidad  
Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S. N. Ciudad Universitaria, CP 04510, CDMX, México  
[martina@unam.mx](mailto:martina@unam.mx)

## Palabras clave:

Toxicidad; polímeros; nanoplásticos; degradación

## Resumen

Antes de que nos pusieran esas imágenes de plásticos en basureros y mares, o saliendo de la nariz de una tortuga en forma de popote, la humanidad pensaba y sentía que los plásticos eran el “material por excelencia”: baratos de producir, resistentes, ligeros y versátiles. La palabra plástico viene del griego *plastikos*, que significa “que se puede moldear”. Por eso se pueden hacer objetos de distintas formas y por lo mismo se utilizan para todo. Ser barato y duradero tiene sus consecuencias, porque se pueden hacer muchos plásticos a bajo costo que persisten mucho tiempo y esto, a su vez, produce una enorme contaminación plástica en el mundo. En general, la idea hoy es tratar de usar menos plástico, para que las montañas de basura plástica (que también están en los mares) vayan disminuyendo. Lo sabemos y somos conscientes de ello. El problema ahora es con

los plásticos que no salen en la foto, que no se ven y que no sabemos el daño que pueden hacer. Son los llamados micro- y nanoplásticos, pequeños pedazos que se van formando cuando el material, que es tan resistente, se va partiendo hasta formar pedazos de menos de cinco milímetros (microplásticos) o menores a cien nanómetros (nanoplásticos). De hecho, comemos el equivalente a una tarjeta de crédito al año de micro y nanoplásticos. Eso ¿nos hace daño? ¿Qué se sabe? Se sabe poco, pero se sabrá más. Por lo pronto esto es parte de lo que tenemos.

Los microplásticos no se descubrieron, ¡se buscaron! Todo empezó con Richard Thompson, un joven voluntario recolector de basura en las playas. Él vio cómo la gente ignoraba la basura que podía estar en pequeños pedazos y sólo recogía la que estaba en grandes piezas, como redes de pescar o llantas. No recogían ni buscaban los pedazos más chicos. Años después, ya como profesor de biología marina en la Universidad de Plymouth (Reino Unido),

se dio a la tarea con sus estudiantes de recoger basura pequeña. Así encontró los microplásticos. Todo lo publicó en 2004, en la revista *Science*, bajo el título. “Perdido en el mar: ¿dónde está todo el plástico?” [Thomson, 2004] En este artículo define a un microplástico como aquella pieza de polímero que mide máximo 5 milímetros. Después de encontrar a los microplásticos buscaron nanoplásticos porque no parecía haber alguna razón para que esos pequeños pedazos de plástico no siguieran rompiéndose. ¡Y los encontraron! Los nanoplásticos son un millón de veces más pequeños que los microplásticos, recordando que un milímetro (mm) equivale a 1 000 000 de nanómetros (nm). Un nanoplástico se define como aquella pieza que tiene un diámetro menor a 100 nm.

¿Cómo se forman los micro y los nanoplásticos? Empecemos pensando en que los plásticos son polímeros. Polímero viene del griego y significa *poly* muchos *mero* partes. Es un material formado por muchas partes iguales que se repiten muchas veces. Por ejemplo, el polietileno es una molécula de etileno que se repite muchas veces (ver Tabla 1). Los polímeros son duraderos porque tardan mucho tiempo en degradarse. Esto significa que son resistentes al ataque microbiano porque, finalmente, en el tiempo que tienen de existencia no ha evolucionado un grupo de enzimas que sea capaz de degradarlos. Los materiales para hacer polímeros vienen principalmente del petróleo, y aunque sí hay enzimas que degradan petróleo, a los plásticos todavía no les llega la hora. Ya se empiezan a descubrir algunas enzimas y algunos organismos, y ya se hacen plásticos biodegradables, pero eso es otra historia.

Tabla 1. Ejemplo de materiales plásticos, su fórmula química y tiempo estimado para su degradación





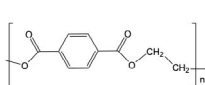

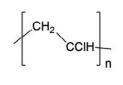
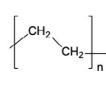
| 500 años   |   | 300 años  | 150 años  |
|--|---|---|---|
|  |  |  |  |
| Poliétileno tereftalato (PET)  | Poliestireno (unicel)   | Cloruro de polivinilo   | Polietileno   |
|  |  |  |  |

Tabla 1. Ejemplo de materiales plásticos, su fórmula química y tiempo estimado para su degradación

En la tabla 1 se presentan algunos ejemplos de objetos hechos con polímeros, su fórmula química y los tiempos estimados de degradación. Recordemos que todo material termina degradándose. El reto es que sea en poco tiempo para que no se nos acumule la basura. Para darnos una idea del potencial contaminante de los materiales también hay que considerar el tiempo de vida de uso que tienen. De los objetos de la tabla 1, las botellas de PET y las bolsas de polietileno se usan y se tiran, por lo que su tiempo de vida es corto, días o meses a lo mucho. La ropa hecha del llamado poliéster (que también es PET) suele durar más, aunque situaciones como la moda también han provocado la cultura de “usar y tirar”. El unicel es uno de los materiales que más contaminan y que menos se recicla. También suele utilizarse una sola vez cuando son vasos y platos, aunque los tortilleros y los envases como los que se usan para el trasplante de órganos tienen una vida más larga. Las muñecas en general “viven” más porque son objetos que se utilizan para jugar por largos periodos tiempo, años incluso. Decimos que “para ver lo que contaminan también tenemos que considerar lo que viven”, porque cuando un material llega a la basura ahí va a permanecer un buen rato. Una bolsa de

plástico, donde colocamos una manzana para llevarla a casa, “vive” unas horas, pero tarda 150 años en degradarse. El análisis costo beneficio sale muy caro cuando los materiales se usan por poco tiempo.

La degradación consiste en cambiar a un material como resultado de factores ambientales, como pueden ser la luz, el calor, condiciones químicas o la actividad biológica. Para degradarse completamente se tiene que formar  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , que es lo que se llama la mineralización. Si los polímeros tienen además otros elementos, como el polivinilo que tiene cloro, o el poliuretano que tiene nitrógeno, la degradación además dará otros productos. De cualquier manera, para poderse degradar se tiene que formar el monómero, es decir, la parte más pequeña que es la que se repite. Se sabe que hay enzimas y gusanos que son capaces de realizar la degradación de los plásticos, pero primero se tienen que despolimerizar hasta formar monómeros y oligómeros. Los oligómeros (del griego ολιγος, que significa poco o pocos) están formados por pocos monómeros. Cuando son largas cadenas de polímero no es tan fácil degradarlos, porque no pasan por la membrana celular de los organismos que los pueden procesar. Monómeros, dímeros y oligómeros son más fáciles de degradar y mineralizar, porque pueden atravesar la membrana celular.

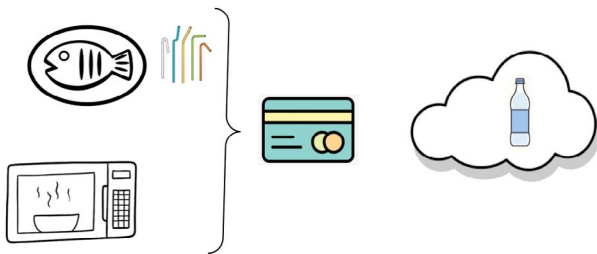
Los micro- y nanoplásticos no necesariamente surgen de algún tipo de degradación, porque en principio los plásticos sólo se parten en pedazos. Cuando se dividen en pedazos es como si se erosionaran. Cuando se hacen pequeños, la fórmula química se conserva y sólo cambia el número de monómeros que hay en la cadena.

Cada nanoplástico de PET sigue siendo PET y conserva sus propiedades, aunque no necesariamente todas, porque quizás ya no es tan versátil y ya no se pueden hacer objetos con ese pedazo. Hoy se sabe que en el mar, el plástico se rompe más fácilmente en pequeños pedazos. Esto se debe a la salinidad, a los microorganismos y la fuerza mecánica de las olas, que van dando golpeteos que favorecen la fractura de los polímeros. Hasta qué tamaño se pueden ir partiendo es algo que todavía no sabemos. En el límite de las cosas, se podría pensar que los nanoplásticos, si siguen dividiéndose, llegarán a formar oligómeros, con lo cual podrían ser más fácilmente biodegradables, pero esto es algo que no sabemos todavía y que habrá que seguir investigando. El problema con el que nos enfrentamos es el tamaño. Son tan pequeños y muchos de ellos transparentes, que son muy difíciles de detectar y manipular. Se analizan por técnicas de microscopía electrónica y por infrarrojo, pero seguimos teniendo problemas con las técnicas de detección.

Los plásticos tirados como basura, además de que se ven horribles, provocan problemas en la vida animal porque taponan las vías de digestión cuando son grandes piezas; las redes o bolsas de plástico atrapan animales marinos y en general les estorban para vivir. Tienen efectos físicos muy perjudiciales, pero parece que no reaccionan, que no son tóxicos, porque no nos envenenan como el cianuro que sí reacciona con la hemoglobina y entonces mueres. En realidad, no sabemos si al comer mucho plástico vamos a terminar envenenados porque, finalmente, en la dosis está el veneno y todo en grandes cantidades nos puede perjudicar. Lo que sí sabemos es

que dañan físicamente a los animales, porque los atrapan, no los dejan respirar y alteran sus aparatos digestivos. Los micro- y los nanoplásticos no provocan esos daños físicos, porque al ser pequeños no atrapan a nadie, ni taponan las vías digestivas. Si no “salen en la foto” porque no se ven y porque no provocan los daños que hacen los plásticos de mayor tamaño, ¿por qué nos preocupan? ¿Dejaremos que se sigan haciendo pequeños hasta que lleguen a formar oligómeros y puedan ser degradados por organismos y enzimas?

Las cosas no son tan sencillas, porque no sabemos si los micro- y nanoplásticos son capaces de envenenar. Lo que sí sabemos es que nos lo comemos con los alimentos y también con los que se van produciendo de los envases de plástico que metemos al microondas para calentar la comida. Se ha estimado que los humanos comemos el equivalente a una tarjeta de crédito al año. Además, están en el aire y los inhalamos o se introducen a través de la piel. No sabemos eso qué daño nos produce. En eso es en lo que se centran muchos trabajos de investigación en los últimos años. ¿Qué nos hacen los micro- y nanoplásticos?



Se estima que ingerimos el equivalente a una tarjeta de crédito al año de plástico con la comida. Además, están en el aire y los respiramos o nos entran por la piel

Los micro y nanoplásticos entran en los animales por tres vías: la digestiva, por la respiración y por la piel. Parece que la más

peligrosa es la vía de la inhalación. En experimentos que se han hecho con el pez cebra se ha encontrado que la presencia de nanoplásticos provoca cambios en la conducta. Otros experimentos con caracoles gigantes indican que no les produce estrés oxidativo ni les perjudican, al contrario, los que comieron plásticos crecieron más. Parece que los microplásticos funcionan como una licuadora en el estómago de estos caracoles, lo que ayuda a dividir los alimentos y eso facilita su digestión. Experimentos con ratones parecen indicar que los nanoplásticos pueden alcanzar el cerebro, pero no se demostró que esto les causara algún problema de salud. Los experimentos con tejidos de pulmón o a nivel celular parecen mostrar que los nanoplásticos son capaces de entrar en la célula y también alcanzar el flujo sanguíneo, con lo cual podrían llegar a cualquier parte del organismo. Estos experimentos en tejidos, *in vitro*, no son capaces de determinar lo que sucede en vivo. Además, en estas investigaciones se utiliza mucho plástico, que es irreal porque en el ambiente nunca se llegará a tener esas cantidades. Hay que hacer experimentos en vivo, con concentraciones más acorde con las que tenemos en el ambiente y buscando los efectos que pueden producir.

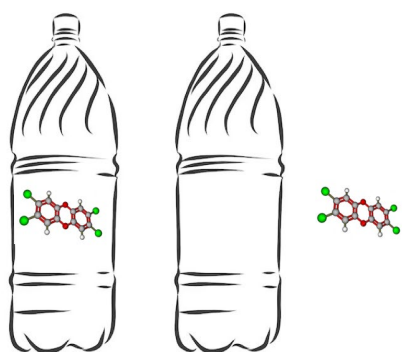
Algunos de los experimentos en vivo se han enfocado en ver qué le pasa al nanoplástico una vez que ingresa en el organismo. En particular hicieron poliestireno modificado, al que le colocaron zirconio radioactivo que podían seguir con imágenes de Tomografías de Emisión de Positrones. Este poliestireno radioactivo se lo dieron a comer a ratones, y después les hicieron las tomografías. En las imágenes encuentran que a las seis horas después de haberlo

ingerido, el microplástico se encuentra en el estómago, después se va moviendo al intestino hasta que después de 48 horas, no aparece ningún rastro del microplástico en el cuerpo del ratón. Este experimento parece indicar que el nanoplastico atraviesa al ratón sin acumularse ni hacerle daño.



Con poliestireno modificado se puede seguir el plástico una vez que entra en el organismo del ratón, usando Tomografías de Emisión de Positrones

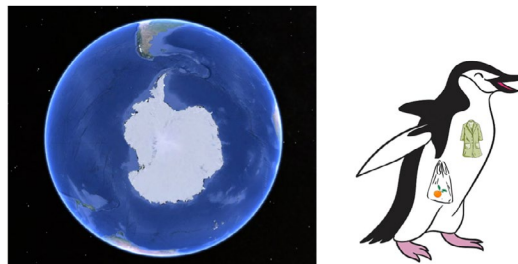
Los plásticos pueden absorber contaminantes químicos y biológicos en su superficie, con lo cual los pueden transportar. Esto se sabe, pero se desconoce si los contaminantes se quedan atrapados en el plástico o si se van soltando. Podrían ser peligrosos los plásticos con contaminantes porque estarían acarreado y entregando contaminantes allá por donde van, o podrían ser beneficiosos si solamente los absorben y ya no los volvieran a soltar, porque sería una forma de atraparlos.



¿Atrapan y sueltan sustancias venenosas contaminantes, o se los quedan y los guardan?

Con toda esta información, que en realidad es un resumen, porque hay mucha más, parece que hay más preguntas abiertas que respuestas certeras. Lo que sabemos es que hay micro- y nanoplasticos en todos sitios, que los humanos ingerimos sin darnos cuenta el equivalente a una tarjeta de crédito al año, que los nanoplasticos absorben contaminantes y poco más. La dificultad en las investigaciones como dijimos antes, está en su tamaño. Son tan pequeños que es difícil hacer investigación. Aquí es donde la química computacional puede dar algunas ideas, pero para cálculos cuánticos incluso los nanoplasticos son sistemas muy grandes. Esa es la paradoja. Son grandes para estudios de química cuántica pero muy pequeños para trabajarlos en el laboratorio. Aun así, nos las arreglamos para saber más de estos materiales. Con la química cuántica, usamos modelos.

Una forma de estudiar a los polímeros con la química computacional es usando oligómeros. Así se han hecho muchas investigaciones exitosas por ejemplo para estudiar polímeros conductores. En particular los resultados que aquí presentaremos se enfocan en dos tipos de nanoplasticos, que fueron los que se encontraron como microplásticos en las heces fecales de los pingüinos de la Antártida: polietileno y poliéster. Se cree que el poliéster se desprende de la ropa al lavarse.



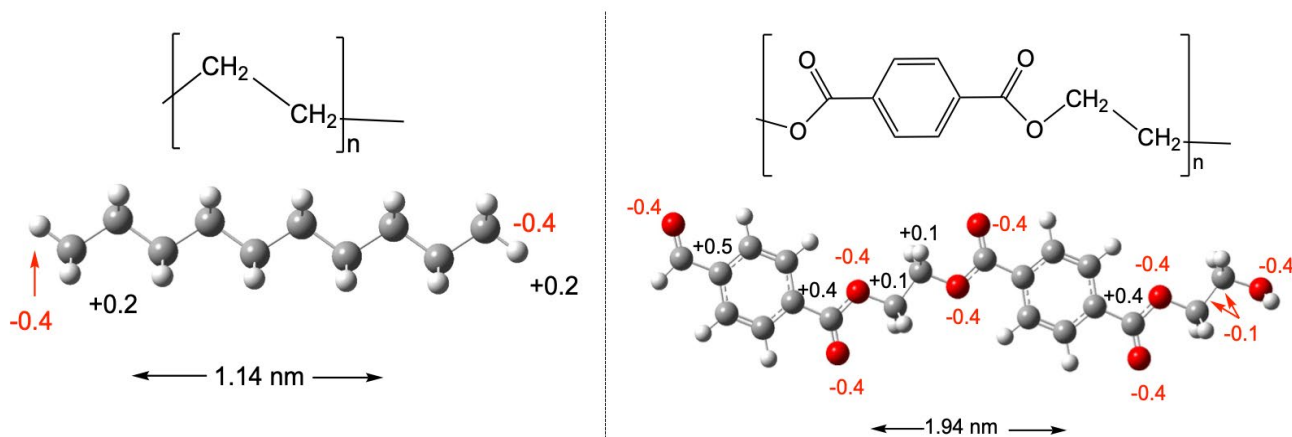
En las heces de los pingüinos de la Antártida se encontraron microplásticos de polietileno y poliéster



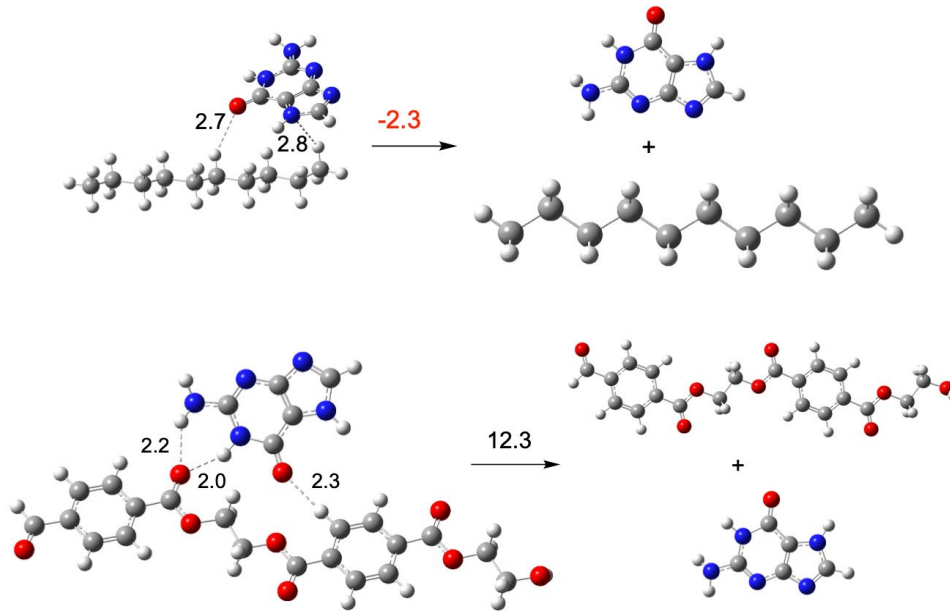
Como modelo de polietileno se utilizó un oligómero de diez átomos de carbono. Para el poliéster se utilizaron dos monómeros. A continuación, se presentan las estructuras de estos dos modelos, una vez realizada la optimización de la geometría. Esto significa que esta es la geometría más estable. El oligómero de polietileno tiene una longitud de 1.14 nm mientras que el del poliéster (que es tereftalato de polietileno, PET) mide 1.94 nm. También se reportan los valores de las cargas atómicas de Mulliken. Con base en estos valores podemos decir que los carbonos del polietileno y los oxígenos del PET tienen carga negativa, mientras que los hidrógenos son positivos. Esto es lo que se espera con base en sus valores de electronegatividad. Lo que se puede deducir al comparar estos dos modelos es que el PET, al tener oxígenos negativos, podrá interactuar con otras moléculas formando puentes de hidrógeno, por ejemplo. En el caso del polietileno los átomos de carbono negativos tienen un impedimento estérico que no les permitirá formar puentes de hidrógeno con otras moléculas. En este caso serán los hidrógenos los que puedan interactuar.

Esto es importante cuando queremos analizar si estos nanoplasticos interactúan con moléculas relevantes para la vida, como las bases nitrogenadas del ADN. Para ver si esto ocurre se calculó la interacción entre estos dos sistemas y la molécula de guanina. La guanina es una de las bases nitrogenadas que forma al ADN. En la figura se observa cómo se enlazan. También se presenta la energía de disociación (en Kcal/mol) que se calcula como la suma de la energía de los productos menos la energía de los reactivos (en este caso, el sistema oligómero-guanina).

En el caso del polietileno, la reacción de disociación tiene una energía que es negativa, lo que significa que los sistemas disociados son más estables que cuando están unidos. Cuando es el PET el que interactúa, se observa la formación de puentes de hidrógeno y la energía de disociación es positiva. Por eso podemos decir que la interacción entre PET y guanina es favorable. Como se predijo cuando se observaron las cargas de Mulliken, los oxígenos del PET y los átomos de hidrógeno del polietileno



Estructuras optimizadas de los dos modelos. Se incluyen los valores de la longitud de la molécula y de las cargas atómicas de Mulliken



Interacción de los oligómeros con guanina. El valor corresponde a la energía de disociación en Kcal/mol. Las distancias de enlace se reportan en Å

forman puentes de hidrógeno. El puente de hidrógeno O---H es más fuerte que la interacción H---H. El PET forma tres puentes de hidrógeno O---H mientras que el polietileno forma dos interacciones H---H y un puente de hidrógeno O---H. Esto explica que el sistema con PET unido a la guanina sea más estable que el del polietileno. Si se enlaza a una molécula tan importante como la guanina, esto puede significar la posibilidad de alterar el funcionamiento de la replicación del ADN y esto tendría consecuencias graves. En este caso, el PET es potencialmente más peligroso que el polietileno.

Con estudios como este se puede investigar la potencial reactividad (y toxicidad) de distintos sistemas poliméricos, para tratar de dilucidar la peligrosidad de estos materiales cuando se vuelven nanométricos. Seguimos preguntándonos si con los nanoplásticos es como con el chile, que mientras más pequeño más picoso. ¿Así serán los plásticos, mientras más pequeños más pe-

ligrosos? No se sabe, pero se sabrá pronto. Lo que sí queda claro es que se producen y se utilizan millones de toneladas de plásticos al año. El compromiso social es usar menos plásticos, aunque no sepamos si los que no salen en la foto son peligrosos. Mientras no se haga nada con los plásticos de la basura éstos son potencialmente dañinos. En una visión optimista del mundo, pensemos que el petróleo con el que se hacen los plásticos se va a terminar algún día. Cuando esto ocurra no habrá nuevos plásticos, pero seguirán estando esas grandes montañas plásticas terrestres y marinas. Como ya no va a haber petróleo, esos plásticos tirados en la basura quizás puedan servir como materia prima. Si así fuera, las montañas de plástico serán como minas de gran riqueza de donde se podrán obtener materiales para hacer nuevos materiales. En este escenario los micro- y nanoplásticos no participan, pero sí lo hace la basura. Son ideas. Quizás algún día se forme un Instituto de Investigaciones en la Basura.

## Agradecimientos

A la DGAPA por la beca recibida a través del Programa de Apoyo para la Superación del Personal Académico de la UNAM (PASPA) y a DGTIC-UNAM por el apoyo con el uso de la computadora a través del proyecto LANCAD-UNAM-DGTIC-141.

Esta investigación se realizó en una estancia sabática en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. Madrid, España. Dedicado a Andrés Barbosa Alcón†.

## Referencias

- 1- Coreño-Alonso J, Méndez-Bautista MT, Relación estructura-propiedades de polímeros Educación Química 2010, 21, 291.
- 2- Fragão F, Bessa F, Otero V, Barbosa A, Sobral P, Waluda CM, Guimarães HR, Xavier JC, Microplastics and other anthropogenic particles in Antarctica: Using penguins as biological samplers. Science Total Environment 2021, 788, 147698.
- 3- Joel FR, Polymer Science & Technology: Introduction to polymer science, Eds. 3, Pub: Prentice Hall PTR Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1995, 4.
4. Lim JZ, Microplastics are everywhere – but are they harmful? Nature, 2021, 593, 22.
5. Nor NHM, Kooi M, Diepens NJ, Koelmans AA, Lifetime Accumulation of Microplastic in Children and Adults. Environmental Science Technology 2021, 55, 5084.
- 6- Riaz U, Singh N, Banoo S. Theoretical studies of conducting polymers: a mini review. New Journal of Chemistry, 2022, 46, 4954.
- 7- Shah AA, Hasan F, Hameed A, Ahmed S, Biological degradation of plastics: A comprehensive review. Biotechnology Advances, 2008, 26, 246.
8. Shen M, Zhang Y, Zhu Y, Song B, Zeng G, Hu D, Wen X, Ren X, Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment: A review. Environmental Pollution, 2019, 252, 511.
- 9- Thomson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis A, Rowland SJ, John AWG, McGonigle D, Russ AE, Lost at Sea: Where Is All the Plastic? Science, 2004, 104, 838.



# Titanato de bismuto para la fotodegradación de tetraciclina

Agileo Hernández Gordillo, Vasti Zabdiel Martínez Flores, Sandra E. Rodil Posada

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM  
Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N  
Delegación Coyoacán, C.P. 04510  
Ciudad Universitaria, D.F. México  
[agileohg@materiales.unam.mx](mailto:agileohg@materiales.unam.mx)

## Resumen

En este trabajo se prepararon materiales de titanatos de bismuto ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ) por el método Sol-Gel, con el fin de estudiar sus propiedades fotocatalíticas. Se estudió el efecto de diferentes solventes (isopropanol, n-butanol y butanol-etilendiamina) a concentraciones fijas de los iones  $\text{Bi}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$  (4:3). Los materiales fueron calcinados a 500 y 600 °C, y las propiedades fisicoquímicas fueron caracterizadas mediante difracción de rayos X en polvo, microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de reflectancia difusa UV-vis. La fotoactividad se evaluó mediante una reacción modelo de fotodegradación de Tetraciclina, usando una lámpara de UV durante 6 h de irradiación.

## Introducción

La contaminación ambiental causada por actividades antropogénicas, como el consumo excesivo de productos farmacéuticos, se ha convertido en un problema a nivel global. Compuestos como la tetraciclina tienen efectos adversos sobre el medio ambiente, causando multiresistencia

a cepas bacterianas que ya no pueden ser tratadas con las drogas actualmente conocidas [1]. El tratamiento de agua contaminada requiere el desarrollo de procesos renovables y sostenibles para eliminar los materiales tóxicos del ecosistema. Uno de estos tratamientos ecológicos, ampliamente adoptados por la comunidad científica, es la oxidación avanzada por fotocatálisis heterogénea, el cual hace uso de semiconductores que generan especies reactivas de oxígeno (ERO) y contribuyen a degradar los compuestos contaminantes. Por medio de la fotocatálisis se pueden eliminar contaminantes orgánicos tales como colorantes, medicamentos, pesticidas, entre otros compuestos recalcitrantes. Los materiales semiconductores utilizados actúan como fotocatalizadores para la fotodegradación de contaminantes orgánicos en presencia de luz UV, sin embargo, la eficiencia del proceso depende en gran medida de las propiedades fisicoquímicas y optoelectrónicas del material [2]. Los fotocatalizadores basados en bismuto han atraído una atención considerable, debido a su estrecha banda

prohibida, mayor movilidad de portadores, gran trayectoria libre media y una larga longitud de onda de Fermi, además de ser económicamente viables [3]. Entre los múltiples compuestos de bismuto se encuentra el titanato de bismuto, que ha demostrado ser efectivo para la degradación de la tetraciclina, principalmente, el  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ . Se ha reportado que las propiedades fotocatalíticas dependen de su fase cristalina y de su morfología, así como del área específica. Diversos métodos se han empleado para obtener titanatos de bismuto, que incluyen: estado sólido, mediante reacción directa de mezcla de reactivos sólidos a altas temperaturas, hidrotermal y el método Sol-gel. Este último es un proceso químico en fase húmeda, ampliamente usado para preparar una gama de materiales nanoestructurados, en donde se utiliza alcohol como el solvente principal del alcóxido metálico. En los últimos años se ha observado que la adición de aditivos orgánicos durante la preparación del material por el método Sol-gel, tales como glicina, etilenglicol, ácido acético, ácido cítrico, entre otros, permite obtener materiales con mayor área superficial, lo que impacta favorablemente en sus propiedades fotocatalíticas. En este trabajo, se realizó una modificación al método (Sol-gel) para la síntesis del titanato de bismuto, variando el medio de disolución de *n*-Isopropanol (Is) por *n*-Butanol (Bu) y Butanol-etilendiamina (EN). Todos los materiales fueron calcinados a 500 y 600 °C, siendo evaluados en la fotodegradación de tetraciclina usando radiación UV.

## Resultados

Se sintetizaron tres materiales en forma de polvos, variando el medio de disolución (BT Is, BT Bu y BT EN), los cuales presentaron cambios en la estructura cristalina y en la

morfología. Cuando la síntesis del material se realiza, típicamente en un medio de **Isopropanol**, el material calcinado a 500 y 600 °C (Figura 1) presenta picos de difracción indicativos de la combinación de dos fases cristalinas: la ortorrómbica  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  y la cúbica  $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ . Ambas fases coexisten en la estructura, sugiriendo la formación de un óxido mixto [4]. Cuando el Isopropanol se sustituye por **n-Butanol** o **Butanol-etilendiamina**, los materiales calcinados a 500 °C presentan picos característicos de una sola fase pura, ortorrómbica ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ) y cúbica ( $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ), respectivamente. Sin embargo, el material **BT Bu**, calcinado a 600 °C mantiene la estructura cristalina de la fase ortorrómbica pura, mientras que para el material **BT EN** (calcinado a 600 °C), presenta otros picos característicos de la otra fase cúbica ( $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ), sugiriendo la formación de un óxido mixto de baja proporción de  $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ .

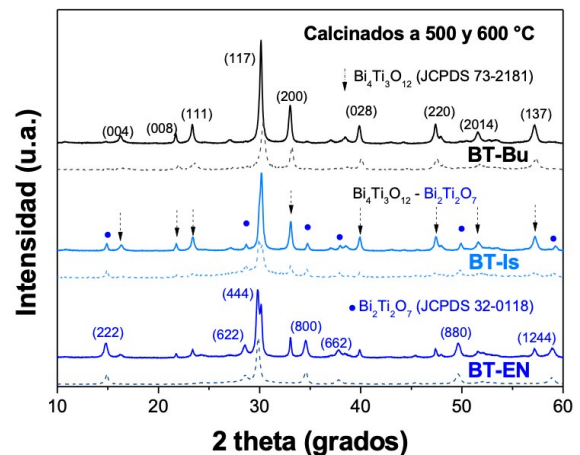


Figura 1. Difractograma de titanatos de bismuto calcinados a 500 y 600 °C, preparados en diferentes solventes

Estos resultados sugieren que las propiedades cristalinas dependen fuertemente del medio de disolución. Las imágenes de microscopía electrónica de barrido de los materiales calcinados a 500 °C (Figura 2),

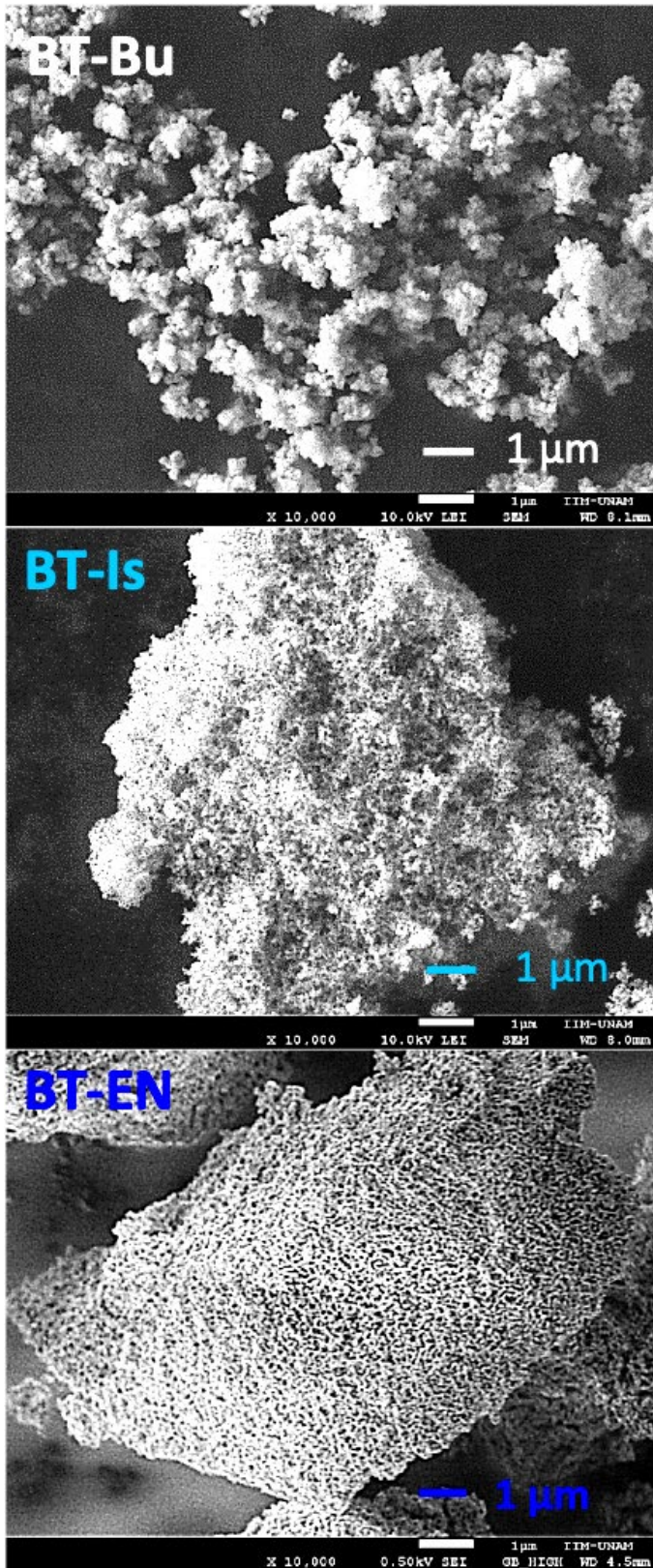


Figura 2. Imágenes SEM de titanatos de bismuto calcinados a 500 °C, preparados en diferentes solventes

muestran que, para la ortorrómbica  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  (BT Bu) se presenta morfología irregular de dimensiones pequeñas (500-900 nm), mientras que el óxido mixto (BT Is) presenta morfología irregular, pero de gran dimensión (6-10 micras). Para los materiales calcinados a 600 °C la morfología y las dimensiones fueron muy similares.

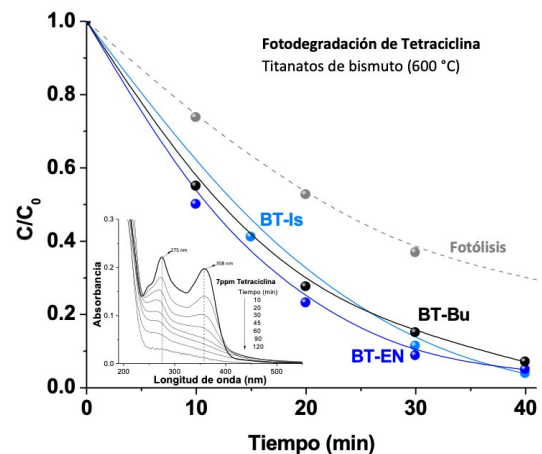


Figura 3. Concentración relativa de la fotodegradación de tetraciclina, usando titanatos de bismuto en radiación UV. Espectro de absorción de tetraciclina (Insertada)

*“La actividad fotocatalítica observada para BT EN, puede deberse a que, al presentar dos fases de titanatos de bismuto, se mejoraron las propiedades ópticas de absorción y la separación de carga por efecto de la heterounión”*

La fase cúbica  $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  (BT EN), además de su gran dimensión en forma de bloques (5 x 150 micras) presenta una estructura totalmente porosa. Bloques porosos similares han sido obtenidos usando metoxietanol como solvente [5]. En relación a las propiedades ópticas de los tres materiales obtenidos se observó que, para los materiales BT Is y BT Bu se presentaron absorciones entre 450 y 350 nm, mientras que para el bloque poroso BT EN se presentó absorción entre 470 y 360 nm, mostrando un ligero desplazamiento

hacia el visible. La brecha de energía calculada para los titanatos de bismuto es de ~3.2-3.1 eV, lo que sugiere que el material puede ser fotoactivado en la región ultravioleta [6]. Las pruebas de fotoactividad en la degradación de 7 ppm de tetraciclina a pH natural ~6.5 indicaron que los titanatos de bismutos calcinados a 600 °C (**BT Is**, **BT Bu** y **BT EN**), presentaron mejor actividad fotocatalítica que los calcinados a 500 °C, e inclusive mayor que la fotólisis en ausencia de material (ver espectro de absorción en la Figura 3). Sin embargo, el bloque poroso que contiene la mezcla de fases  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  y  $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  (**BT EN** calcinado a 600 °C) es el que presentó la mayor actividad fotocatalítica a 40 min. de reacción. Esto puede atribuirse a una mayor absorción óptica en el visible.

En este trabajo se lograron obtener titanatos de bismuto de una sola fase (ortorrómbica) al usar Butanol como solvente y mezcla de dos fases cristalinas (ortorrómbica y cúbica) al usar Butanol-etilendiamina, modificando también las propiedades morfológicas de los materiales calcinados. El material BT-EN (en forma de bloque poroso y calcinado a 600 °C) presenta alta actividad para la degradación de contaminantes farmacéuticos por fotocatalisis, con mayor potencial para degradar otros contaminantes.

## Referencias

- [1] Khodadoost, S., et al. (2017). "Optimization of hydrothermal synthesis of Bismuth titanate nanoparticles and application for photocatalytic degradation of Tetracycline." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5(6): 5369-5380.
- [2] Niu, S., et al. (2020). "Morphology-dependent photocatalytic performance of  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ." *Ceramics International* 46(5): 6782-6786.
- [3] Pirgholi-Givi, G., et al. (2019). "The influence of preparation parameters on the photocatalytic performance of mixed bismuth titanate-based nanostructures." *Physica B: Condensed Matter* 575: 311572.
- [4] Qian, K., et al. (2017). "Construction of  $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  / $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  composites with enhanced visible light photocatalytic activity." *Materials Letters* 206: 245-248.
- [5] Gao, F., et al. (2020). "Tunable structure and intensive upconversion photoluminescence for  $\text{Ho}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  codoped bismuth titanate composite synthesized by sol-gel-combustion (SGC) method." *Ceramics International* 46(3): 3015-3022.
- [6] Gan, H., et al. (2017). "Enhanced photocatalytic removal of hexavalent chromium and organic dye from aqueous solution by hybrid bismuth titanate  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ." *Research on Chemical Intermediates* 44(3): 2123-2138.



# Microplásticos: un nuevo tipo de contaminantes emergentes y persistentes

Esmeralda Rivera-Gutiérrez, Sonia Martínez-Gallegos, Ma. Guadalupe Macedo-Miranda, Javier Illescas

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, CP 52149. Metepec, Estado de México  
[esmeralda.rg@toluca.tecnm.mx](mailto:esmeralda.rg@toluca.tecnm.mx)

## Resumen

El plástico es un material muy común e indispensable en nuestra vida diaria, casi todo lo que consumimos o usamos está elaborado o contiene una parte de plástico. Desde su creación ha brindado diversos beneficios y comodidades, por lo que se considera uno de los materiales más producidos por el ser humano.

Sin embargo, no todo es positivo, recientemente han surgido evidencias de su efecto nocivo en los seres vivos, por lo que se ha catalogado como un nuevo contaminante emergente, y no es que antes no hubiese efectos tóxicos, lo que pasa es que con un consumo descontrolado y una mala disposición de estos residuos ha ocasionado que las concentraciones de estos contaminantes alcancen niveles que por primera vez muestran sus efectos a niveles visibles en los seres vivos y sus ecosistemas.

Los estudios realizados en agua, tierra y aire muestran que los plásticos se fragmentan en partículas pequeñas, llamadas micro-

plásticos, las cuales tienen tamaños que van desde 0.1  $\mu\text{m}$  a 5 mm. Estas, por su tamaño, pueden distribuirse ampliamente por cada rincón del planeta e incluso ingresar a la cadena alimenticia.

Como resultado de las primeras investigaciones se ha encontrado que los plásticos han ocasionado la muerte de peces y mamíferos, en algunos casos se ha reportado también la mutilación de algún miembro. En el caso de los microplásticos se han encontrado en peces y también se sabe que afecta el crecimiento de las plantas. Además, se estima que la cantidad de microplásticos consumidos por el ser humano es de 39 000 hasta 52 000 partículas por persona, lo cual puede variar según la edad y el sexo. Esta cantidad aumenta si se suma lo inhalado por contaminación del aire y también por el consumo de agua embotellada en plástico.

Con base en lo anterior, es evidente la necesidad de implementar normativas y leyes para evitar que este problema siga crecien-



do. De igual manera es necesario una educación ambiental y mayor investigación del tema para conocer el verdadero impacto de este contaminante en nuestro medio ambiente y en nosotros mismos.

### Palabras clave:

Microplásticos, contaminante emergente, impacto de los microplásticos en el medio ambiente.

### Introducción

Con la aparición del primer plástico sintético, el mundo de los polímeros fue revolucionado, dando lugar a más de este tipo de materiales con características y diseños únicos que darían paso a un sinnúmero de aplicaciones como bolsas, llantas, tubos de PVC, etc. Estos tienen periodos de vida muy largos y no son fácilmente degradados, por lo que su persistencia en el ambiente es alta. Si a esta característica se le suma el creciente abanico de aplicaciones de los polímeros (que van desde los empaques de materiales, cubiertos, electrodomésticos, cables, envases de productos de higiene personal, cosméticos, dispositivos médicos, etc.) resulta en un aumento de estos desechos, presentes en forma de residuos en el agua, en los suelos y en el aire. Por otro lado, tampoco existen normas que regulen el uso y disposición final de los plásticos y el medio que más se ha visto afectado por la presencia de este tipo de residuos son los mares, en donde hay evidencia de miles de toneladas de dichos materiales flotando y dañando la vida marina (que ya ha ocasionado la muerte de tortugas y ballenas que los consumen al confundirlos con alimento, causándoles daños de salud). Aunado a todo esto, también se observan problemas de amputación de miembros, por el enredo de materiales plásticos en el cuerpo (tales como

bolsas, empaques de bebidas, popotes, etc.). Todo esto resulta en una llamada de atención para preguntarnos acerca del impacto que tienen estos desechos en nuestro entorno ambiental. Es por ello que diversos investigadores a nivel mundial han realizado estudios para conocer su presencia y sus efectos en el medio ambiente, y sus resultados han mostrado que el problema era más grande de lo estimado, debido a que al estar expuestos a las condiciones ambientales como la radiación solar, la humedad y la abrasión mecánica, los plásticos se rompen y forman partículas más pequeñas llamadas microplásticos (MP), que pueden ser ingeridas por los animales y entrar a la cadena alimenticia. Muestra de ello son las evidencias de afecciones en distintos organismos vivos, incluso se ha publicado información acerca de los posibles efectos en la salud humana, lo que ha encendido los focos rojos y con ellos la necesidad de detectar MP en los medios ambientales. De manera más reciente, con la pandemia de COVID-19, el consumo de plásticos se incrementó de manera considerable, evidenciando aún más su impacto en el agua, aire y suelo.

Es por esta razón que la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), en el año 2014, publicó un informe sobre las actividades de riesgos emergentes (Update on EFSA's activities on Emerging Risks 2012-2013), en el que se identificó a los microplásticos y nanoplásticos como un nuevo riesgo emergente y se informó de la falta de información científica disponible al respecto<sup>1</sup>.

Por lo tanto, es evidente que los plásticos no “desaparecen”, sólo se fragmentan en pedazos cada vez más pequeños. Estos, a su vez, pueden servir como contenedores y

transportadores de otros compuestos tóxicos tales como pesticidas, metales pesados, ftalatos, bisfenoles, difenil éteres polibromados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y bifenilos policlorados (PCB), lo que aumenta su peligrosidad. En este artículo se describe de forma muy breve la definición de los microplásticos, su origen y detección, así como las principales perspectivas que se tienen de este nuevo tipo de contaminantes.

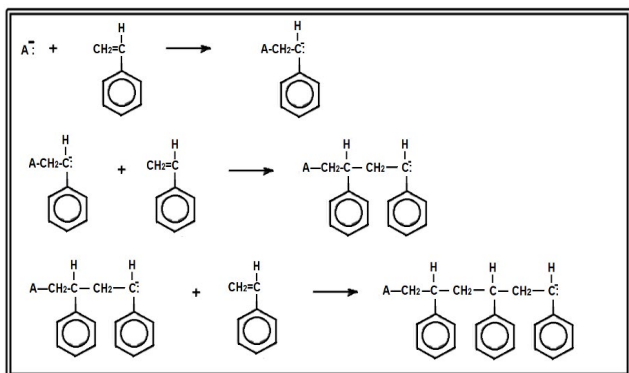


Figura 1. Unión de monómeros para formar un polímero (Miranda, 2015)

## Polímeros y plásticos

La palabra polímero proviene del griego poly, que significa “muchas”, y mers “partes”, por lo tanto, está formado por moléculas más pequeñas llamadas monómeros, que al unirse entre sí forman moléculas de gran tamaño denominadas macromoléculas, como se muestra en la Figura 1.

Estos polímeros se pueden clasificar de acuerdo a su origen en:

- Polímeros naturales: se encuentran presentes en la naturaleza o provienen de los seres vivos, ejemplo de ello son el algodón, la seda y la celulosa de la madera.
- Polímeros semisintéticos: se obtienen por la transformación química de polímeros naturales. En estos casos no se destruye por completo su estructura molecular, por ejemplo, la seda artificial.

- Polímeros sintéticos: se obtienen de manera artificial, es decir, se sintetizan a partir de sustancias de bajo peso molecular (monómeros). Algunos ejemplos son el nylon, poliéster, adhesivos, y poliolefinas<sup>2</sup>.

Los plásticos suelen fabricarse a partir de polímeros sintéticos derivados del petróleo o el gas, mediante la adición de diversos aditivos químicos. En general, el término plástico se aplica a una amplia gama de materiales que en alguna de sus etapas de fabricación son capaces de fluir de tal manera que pueden moldearse, fundirse, hilarse o aplicarse como recubrimiento.

Los plásticos son materiales económicos, livianos, fuertes, duraderos, resistentes a la corrosión y con altas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico. Esto se debe a la gran diversidad de polímeros sintéticos que, con sus propiedades, facilitan la producción de una gran variedad de materiales con características diferentes<sup>3</sup>.

## Los plásticos en la vida diaria

El primer plástico tuvo su origen como resultado de un concurso realizado en 1860, en los Estados Unidos, cuando se ofrecieron \$ 10 000 dólares a quien produjera un sustituto del marfil para la fabricación de bolas de billar. Ganó el premio John Hyatt, quien inventó un polímero al que llamó celuloide (el cual, a largo plazo, no resultó un buen material para la fabricación de bolas de billar). Este hecho hizo que se sentaran las bases para la síntesis de este tipo de materiales.

En la década de 1930, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno formaba polímeros bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico (material que a temperaturas relativamente altas se vuel-

ve deformable o flexible) al que llamaron polietileno (PE). Hacia los años 50 apareció el polipropileno (PP); posteriormente, se descubrió que al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloro se producía el cloruro de polivinilo (PVC)<sup>4</sup>.

Con el paso del tiempo el plástico se volvió un material muy común e indispensable, llegando a ser uno de los materiales más producidos por el ser humano<sup>5</sup>. En consecuencia, la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI) desarrolló en 1988 un código de identificación que es ampliamente utilizado por el sector industrial para identificar la composición de este tipo de productos, y al mismo tiempo proporciona información de su reciclaje. Este código consiste en la asignación de un número del 1 al 7 en el interior del signo de reciclado (triángulo de flechas en seguimiento) tal y como se muestra a continuación<sup>6</sup>:

Cada uno de estos materiales se describen como:

1. PET (polietileno-tereftalato): se trata de un plástico liviano, semirrígido o rígido resistente a los impactos y que protege principalmente líquidos. Con su reciclado se obtiene también el relleno para almohadas o alfombras.
2. PEAD ó HDPE (polietileno de alta densidad): es un plástico opaco y duro, liviano, pero resistente. Sus usos más comunes son en envases de lácteos, tuberías, maceteros y bolsas de supermercado, las cuales actualmente están prohibidas debido al uso indiscriminado que tuvo en años anteriores.
3. PVC (cloruro de polivinilo): debido a que contiene un átomo de cloro evita la proliferación de microorganismos. Es un tipo de plástico muy resistente, lo que le permite conservar la integridad de los productos,

#### Guía de Reciclaje de Plásticos



Figura 2. Guía de reciclaje para plásticos (Ortiz, 2021)

- entre los que se incluyen los medicamentos. No obstante, se recicla poco y su uso en alimentos se encuentra restringido debido a la facilidad con la que desprende diversas toxinas. Se utiliza principalmente en la industria de la construcción y envases de detergentes.
4. PEBD (polietileno de baja densidad): es un polímero mucho más delgado que otros y posee una alta resistencia al calor, es utilizado también para películas plásticas con termosellado, bolsas de alimentos congelados, bolsas para basura y vasos para café.
  5. PP (polipropileno): se trata de un plástico rígido mucho menos frágil que otros. Tiene un elevado punto de fusión, por lo que se utiliza en productos utilizados en microondas y en tapas de botellas.
  6. PS (poliestireno): plástico incoloro y duro con poca flexibilidad, utilizado en bandejas de carne y embalaje de electrodomésticos.

El Centro Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (CIIC) lo clasifica en el grupo 2A como probable cancerígeno para el ser humano, debido a que al calentarse se puede filtrar su monómero, el estireno, en los alimentos.

7. Otros plásticos: esta clasificación indica que el envase fue fabricado con un polímero diferente a los mencionados en las categorías anteriores, por lo que al no conocer el material que lo forma no se pueden identificar sus posibles daños a la salud<sup>6</sup>.

### ¿Qué son los microplásticos?

Cuando los plásticos se convierten en residuos y se liberan al medio ambiente (como consecuencia del manejo inadecuado de sus desechos), estos quedan expuestos a las condiciones climáticas del medio, tales como el viento, la radiación solar y la humedad, las cuales influyen en la degradación de aquellos, por lo que comienzan a fragmentarse en piezas de menor tamaño. Estos pequeños fragmentos de diversas formas y tamaños que van desde 0.1  $\mu\text{m}$  a 5 mm de longitud se conocen hoy en día como microplásticos (MP) y representan un total de 51 billones de desechos<sup>3</sup>. Los MP se pueden clasificar según su origen en dos grupos:

- Se denominan MP primarios a las piezas de plástico que se fabrican directamente en tamaño micrométrico para su implementación en productos de limpieza, cosméticos, pinturas, exfoliantes y pasta de dientes. También se usan partículas de acrílico, melanina y poliéster como implementos de limpieza de maquinarias y barcos<sup>4</sup>.
- Los MP secundarios se forman por la fragmentación de las partículas plásticas más grandes liberadas en el medio ambiente, por lo que están sujetos a varios procesos de fotooxidación y oxidación térmica, des-

pués de su interacción con la radiación solar, así como a la abrasión mecánica en el medio ambiente<sup>3</sup>.

En consecuencia, este tipo de contaminación es causada por el desecho directo de estas partículas en cosméticos, pinturas o fibras sintéticas durante el lavado de la ropa, sumado a los que se generan por la degradación de plásticos de mayor tamaño. Se ha comprobado que los MP pueden retener en su estructura y en su superficie, sustancias tóxicas, como aditivos químicos (ftalatos), monómeros residuales, pesticidas y sustancias como retardadores de flama, biocidas o hidrocarburos poliaromáticos que posteriormente pueden ser liberados<sup>5</sup>.

También se ha demostrado que la electro-negatividad de los MP parece ofrecer las condiciones ideales para la acumulación de metales como cobre y zinc<sup>8</sup>. La presencia de estas partículas en agua, aire y suelo han llegado a niveles que muestran efectos tóxicos en el medioambiente y el ecosistema; un ejemplo de ello es lo reportado en 2022, por Lauren y colaboradores, quienes identificaron 39 MP en 11 de las 13 muestras de tejido pulmonar que analizaron, identificando 12 tipos diferentes de polímeros.

Otro estudio realizado por el Departamento de Recursos del Mar del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, unidad Mérida, utilizó al caracol rosa (*Strombus gigas*) como especie que actúa como señal de alerta ante las condiciones ambientales, para analizar la contaminación por MP en el Caribe, los resultados mostraron que todos los caracoles rosas analizados los presentaron en sus heces fecales.

También en los mamíferos de gran tamaño, como las ballenas hembras, se encontraron ftalatos, los cuales se sabe que afectan las funciones reproductivas, particularmente durante la gestación o en los primeros meses del desarrollo del feto, según lo reportado por Olavarrieta en 2017<sup>8</sup>.

### ¿Dónde y cómo se encuentran los microplásticos?

La distribución de los MP puede ser causada por varios factores, como la mala disposición de los desechos plásticos que se depositan en tiraderos a cielo abierto o se desechan directamente en los cuerpos de agua. Así ocurre con las microfibras que provienen de la ropa que utilizamos y que es elaborada con textiles sintéticos (al menos 35 %) y que en cada lavado se desprenden en promedio 20 000 de estas microfibras que llegarán a los océanos a través de las aguas residuales. Asimismo, el desgaste de las llantas de nuestros autos contribuye en un 30 % a los MP producidos y el polvo de las ciudades en un 25 %<sup>8</sup>.

Con respecto a las plantas de tratamiento de aguas residuales con presencia de MP, estos no son eliminados durante el proceso debido a que no fueron considerados en el diseño. En consecuencia, estas aguas residuales desembocan en el mar, donde son transportados a diversos lugares por las corrientes oceánicas, el tráfico de barcos o actividades antropogénicas en la zona costera. Específicamente en México, se han encontrado grandes cantidades de partículas microplásticas en sedimentos marinos. El promedio obtenido fue de 547 unidades de MP/kg, 129 unidades de MP/m<sup>2</sup> y la concentración de MP en agua fue de 2 970 unidades por m<sup>3</sup>. Asimismo, el promedio encontrado en organismos marinos (peces)

fue de 4.5 unidades de MP/individuo<sup>8</sup>. Los MP en el ambiente se pueden encontrar en diferentes entornos, tales como los que se enumeran a continuación:

### Agua dulce

En este caso, los MP secundarios y primarios, en su mayoría, provienen de las aguas residuales descargadas por las casas y de la basura que se desecha directamente en ríos, los cuales después se dirigen a diferentes ecosistemas donde son ingeridos por los seres vivos e incorporados a la cadena alimenticia e inevitablemente llegan a niveles que podrían afectar la salud humana. En este contexto, las lavadoras domésticas han sido identificadas como la fuente principal de estos MP, encontrando que pueden llegar a producir más de 1 900 fibras por ciclo de lavado. Esto resulta alarmante debido a que la población crece y las personas cada vez usan más textiles sintéticos, lo que seguirá aumentando la contaminación por este tipo de MP. Además, se ha encontrado que estas partículas, pueden ser colonizadas por bacterias que son distintas a las presentes en el agua de los ríos y su materia orgánica suspendida. Estas evidencias demuestran que deben ser considerados como un medio de transporte de microorganismos.

Como ya se ha mencionado, el destino principal de las aguas residuales son los ríos, los cuales pueden tener una gran importancia en el transporte de MP hacia hábitats marinos y grandes lagos. Sin embargo, los estudios sobre MP y sus concentraciones en ríos son sumamente escasos. Con respecto a los lagos, una investigación en la zona de los grandes lagos en Estados Unidos informó que el recuento de estos varía entre cero y 450

000 partículas de MP/km<sup>2</sup>. Una densidad promedio mucho más baja fue encontrada en un lago de Mongolia (20 264 partículas por km<sup>2</sup>), en donde no se observaron microperlas, pero sí residuos de botellas plásticas y redes de pesca<sup>5</sup>.

Finalmente, uno de los reservorios naturales de agua más grandes del planeta, los glaciares, también presentan concentraciones medibles de MP. Los glaciares son bloques de hielo y grandes reservorios hidrológicos esenciales que almacenan y liberan agua dulce en varias escalas de tiempo. Los MP que están atrapados en estos hielos serán liberados al océano abierto a medida que estos se derritan. En los lugares más remotos del ártico se reveló que existen micropartículas acumuladas en lugares lejanos de centros poblacionales y que el hielo marino podría ser un importante depósito mundial e histórico de partículas hechas por ser humano<sup>5</sup>.

### Agua salada

Los ecosistemas más estudiados en cuanto a la presencia de MP son los océanos y han sido documentados para casi todos los tipos de ambientes marinos y playas<sup>5</sup>. Los desechos plásticos en la superficie de océano Atlántico y Pacífico se reportaron por primera vez a principios del año 1970. Las investigaciones apuntan a que la dispersión de MP en los mares ha sucedido por una fragmentación selectiva de tamaño y a un transporte de estos a aguas más profundas a través de procesos físicos y biológicos. Además, como permanecen durante muchos años en los océanos, por estar protegidos de la degradación debida a factores externos, pueden ser ingeridos por una amplia variedad de organismos marinos. Por estas razones se piensa que la mayor concentración de MP se encuentran

a 200 y 600 m de profundidad en el mar. Si esto es verdadero, los depósitos marinos más grandes y poco estudiados, pueden estar en cuerpos de agua y comunidades de animales a altas profundidades del mar<sup>5</sup>.

### Matriz sólida

Es importante saber que los plásticos tienen diferente densidad, por lo que hay unos que flotan al tener una densidad menor que la del agua de mar (como las bolsas de plástico), pero hay otros que se hunden como el polietilentereftalato (PET) y las fibras de poliéster de la ropa. Esto indica que la presencia de MP, tanto en agua como en sedimentos marinos, aumenta la probabilidad de ser ingeridos por los seres vivos como peces, animales que viven en los fondos marinos e incluso el plancton<sup>8</sup>.

Los MP que llegan al fondo de los cuerpos de agua pueden formar parte de los sedimentos que se acumulan debido a su lenta degradación. Un estudio sugirió que estas micropartículas presentan una baja concentración en sedimentos ya que, en su distribución a lo largo de un río, los resultados fueron irregulares e inesperados. El sitio en donde menos MP se detectaron fue en efluentes cercanos a industrias. De la misma manera, otro estudio encontró MP en sedimentos marinos de aguas profundas de 1 100 a 5 000 m. En el caso de suelos agrícolas, estos contaminantes provienen en su mayoría de los fertilizantes orgánicos, el compostaje, los lodos residuales y los fertilizantes nitrogenados, ricos en urea, recubiertos con polímeros que sirven para reducir las pérdidas por la volatilización. Una evaluación de MP a partir de sedimentos reportó que las proporciones de poliéster y fibras acrílicas, normalmente usadas en la ropa, presentaban semejanzas a las encon-

tradas en hábitats que reciben descargas de aguas residuales, lo cual podría explicar su origen. Otro estudio también demostró que, a mayor profundidad, la concentración disminuye, esto indica que la acumulación de MP es proporcional al tiempo y de relativa modernidad; es decir, los sedimentos representan un registro útil del pasado y presente del impacto por plástico en el mundo<sup>5</sup>.

En general, la concentración de MP depositados en los sedimentos es de cuatro a cinco veces más elevada que para el agua. Esto se debe a la combinación de los diversos factores climáticos, por lo que sufren procesos de oxidación de manera acelerada. Finalmente, estos estudios indicaron que su distribución en el sedimento es desigual, porque depende de las propiedades de las micropartículas y la influencia de factores ambientales tales como vientos y corrientes<sup>8</sup>.

## Plantas

Debido a que las plantas desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas terrestres, la presencia de MP en el suelo produce una interacción entre ambos y cuyos efectos potenciales son motivo de preocupación. Estudios iniciales han demostrado que la exposición de los MP puede inducir efectos en las plantas terrestres con respecto a su morfología, fisiología e incluso estructura. Por su tamaño, tanto estos como los nanoplásticos pueden penetrar las raíces de las plantas, transportándose hacia el tallo y las hojas, para ingresar finalmente a la cadena alimentaria<sup>9</sup>.

En un estudio realizado por Mejía-Peláez en 2017, se evaluó tanto el efecto de la incorporación de plásticos biodegradables y convencionales (LDPE) en suelos arenosos utilizados para el crecimiento de plantas de

trigo (*Triticum aestivum* L.), como el efecto del tamaño de estas partículas, sus MP (< 1 mm) y macroplásticos (5 – 10 mm) durante el crecimiento de la planta. Los resultados mostraron que cuando las partículas tenían un tamaño menor a 1 mm retrasaban el crecimiento de las plantas de trigo<sup>10</sup>. Por otro lado, Wang y colaboradores, en 2022, reportaron que los MP pueden cambiar la función de las plantas en comunidades vegetales<sup>9</sup>.

## Detección de microplásticos en agua y sedimentos

La presencia de MP en diversas matrices ambientales, organismos y productos ha planteado la necesidad de su análisis tanto cualitativo, es decir qué contiene, como cuantitativo, o sea en qué cantidades, con el fin de proporcionar datos sobre la abundancia y especificación de los tipos de MP. La complejidad misma de las diferentes matrices plásticas ha obligado a los investigadores a aplicar más de un método analítico para identificar la presencia de estas micropartículas. Los métodos analíticos que por el momento han sido utilizados para cumplir con este propósito se pueden clasificar como: identificación visual, microscopía óptica y electrónica de barrido, métodos espectroscópicos tales como la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y la espectroscopía Raman. Dentro de los métodos cromatográficos, los térmicos pueden incluir pirólisis: cromatografía de gases/espectrometría de masas (Py-GC-MS), desorción térmica: cromatografía de gases/espectrometría de masas (TD-GC-MS) o análisis termogravimétrico (TGA) junto con cromatografía de gases acoplada a masas (GC-MS); algunos menos comunes incluyen a la cromatografía líquida (LC) y la cromatografía de permeación en gel (GPC)<sup>7</sup>.

## Los microplásticos como contaminantes emergentes

La contaminación por MP comenzó como una problemática de contaminación marina, pero en la actualidad se ha convertido en un problema de salud pública. Hoy en día, diversos estudios revelan que están distribuidos en todos los continentes y océanos del planeta. Debido a que los MP continuamente se están fragmentando y distribuyendo en la Tierra, incluso se han detectado micropartículas en el aire, suelo, sedimentos superficiales y de aguas profundas, aguas interiores y exteriores, arena de playa, sistemas marinos, columnas de agua, mar abierto, e incluso en zonas remotas como las regiones polares y algunos glaciares.

Las consecuencias de los MP y su propagación se comenzaron a estudiar con más detalle y profundidad a principios del siglo XXI. Sin embargo, la limitante es aún la inconsistencia en los métodos de muestreo y las unidades de concentración, lo que hace difícil la comparación entre estudios. A pesar de que existen varias investigaciones en curso, los efectos ecológicos por la contaminación de MP son aún poco conocidas e inciertas debido a las diferencias metodológicas.<sup>5</sup>

En la actualidad la contaminación por plásticos y MP es considerada una de las principales amenazas globales, y, al mismo tiempo, uno de los indicadores más importantes para evaluar el impacto de nuestra sociedad en el medioambiente. Debido a su uso indiscriminado, así como la mala administración de los residuos, los plásticos están acumulándose y fragmentándose en todos los ecosistemas del mundo. Además, se van incluyendo en la cadena alimenticia y están relacionados con la muerte de

varias especies de vida silvestre<sup>5</sup>. También, un aspecto preocupante de los MP es que acumulan diversas sustancias tóxicas, entre ellas, contaminantes como los insecticidas, fertilizantes organoclorados y algunos conocidos como orgánicos persistentes, que son altamente cancerígenos y causantes de problemas en los órganos reproductivos<sup>8</sup>.

En 2014, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) publicó un informe sobre las actividades en riesgos emergentes que se llevaron a cabo durante esos años (Update on EFSA's activities on Emerging Risks, 2012-2013). En ese informe se identificó a los MP y nanoplásticos como un nuevo riesgo emergente; sin embargo, también quedó en evidencia la falta de información científica disponible al respecto. Después, en 2016, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria para Contaminantes en la Cadena Alimentaria (CONTAM) emitió una declaración sobre la presencia de estas partículas en los alimentos, con especial énfasis en los productos del mar, debido a que (por su tamaño) pueden ser ingeridos por los animales marinos y de esta manera entrar en nuestra cadena alimenticia. En ella se incluyó información relativa a los aditivos de los plásticos y a los contaminantes químicos que pudieran transferirse desde estas partículas a los tejidos comestibles y, también, una estimación de la exposición de la población. Actualmente no existe ninguna legislación, ni nacional ni europea, que regule la presencia de MP y nanoplásticos como contaminantes en los alimentos y en el ambiente<sup>1</sup>.

## Métodos de tratamiento para eliminar microplásticos

Carr y Thompson, en 2019, realizaron un análisis de los procesos que contribuyeron a la remoción de sólidos durante el trata-



miento de aguas residuales y evaluaron qué tan efectivos fueron para remover MP. La investigación se basó en el estudio del flujo de salida del agua tratada en el suroeste de California. El análisis mostró que la mayoría de las partículas que entraron a las plantas de tratamiento de aguas residuales consideradas en el estudio fueron removidas en la sedimentación primaria debido a que los plásticos, al igual que otros residuos sólidos inorgánicos, tienen densidades  $> 1.0$  mg/L, por lo que pueden ser aislados a través de su sedimentación.

Al parecer, estas plantas de tratamiento de aguas residuales son capaces de separar los diferentes tamaños de partícula gracias a sus diferencias de densidad; por lo que, una vez separadas, estas fases aisladas se vuelven susceptibles para su eliminación directa a través de simples procesos físicos y mecánicos. Así, estos métodos ayudarían a disminuir las descargas por MP al medio ambiente<sup>11</sup>; sin embargo, aún no está claro como separarlos de los sólidos sedimentados o de las otras matrices para evitar su deposición en suelos y contaminarlos.

### **El impacto de los microplásticos en la salud**

Las rutas principales de exposición humana a los MP son la inhalación, ingesta y el contacto con la piel. Su inhalación puede provenir de la contaminación aérea por textiles, neumáticos de caucho sintético, polvo urbano, entre otros, mientras que su ingestión se produce por el consumo de diferentes alimentos y agua potable. Esta última se debe a que la mayoría de los filtros usados en el tratamiento de potabilización del agua no están diseñados para retener partículas de MP. Se reportó

que partículas menores a un diámetro de  $130 \mu\text{m}$  son capaces de penetrar tejidos humanos y desencadenar una respuesta al liberar monómeros, metales pesados y contaminantes orgánicos. En la actualidad se podría estar dando una ingesta inadvertida e indiscriminada de micropartículas de PET y PE, debido a que estos polímeros son usados en la fabricación de envases desechables de bebidas y comida rápida. Como lo reportó una investigación en heces humanas realizada por Schwabl y colaboradores en 2019, en la cual estos dos materiales se encontraron en mayor concentración<sup>12</sup> y pueden estar relacionados con el incremento en el consumo de comida rápida en todo el mundo y al aumento en el uso de envases plásticos, cuyos MP son ingeridos involuntariamente junto con los alimentos. Asimismo, se ha demostrado que los colorantes dispersivos de fibras de poliéster y acrílico causan dermatitis, incluso microfibras ingeridas mediante inhalación podrían estar relacionadas con el cáncer de pulmón debido a que algunos estudios han identificado fibras plásticas y de celulosa en tejidos pulmonares humanos. Por todo esto, es muy probable suponer que una mayor exposición a MP puede conducir a enfermedades neurodegenerativas, trastornos inmunes y cáncer.

Una estimación realizada por Cox y colaboradores en 2019<sup>13</sup>, acerca del consumo de microplásticos reporta que su ingesta anual es de un intervalo que va desde 39 000 hasta 52 000 partículas por persona, lo cual puede variar según la edad y el sexo. Esta estimación incrementa de 74 000 a 121 000 cuando se considera también la inhalación de los MP. Además, se adicionan otras 4 000 micropartículas que corresponden

al consumo de agua de grifo, en tanto que si la ingesta es de agua embotellada llega hasta 90 000 partículas anuales<sup>5</sup>.

### La importancia de la disposición final de los plásticos para reducir la generación de microplásticos

A pesar de que el conocimiento mundial acerca de los MP ha aumentado significativamente, aún se carece de una comprensión integral acerca de las concentraciones, ciclos y destinos de los desechos plásticos, sobre todo en cuerpos de agua, lo que limita la capacidad de implementar políticas efectivas a gran escala y estratégicas de conservación<sup>5</sup>. La gran cantidad de MP encontrados en el ecosistema indica que no hay un manejo adecuado ni una buena regulación al respecto, lo que está causando un deterioro ambiental progresivo. Por lo tanto, es de suma importancia ser conscientes del uso de los plásticos y sus posibles consecuencias. La educación ambiental, la investigación y la implementación de normas y leyes muy estrictas son necesarias para evitar que este problema siga creciendo<sup>8</sup>.

Actualmente, no existe ninguna legislación, ni mexicana ni europea, que regule la presencia de MP y nanoplasticos como contaminantes en los alimentos. Sí están disponibles, en cambio, los métodos para la identificación y cuantificación de MP, aunque no de los nanoplasticos en los alimentos. Pese a que no existe una legislación para estas partículas como contaminantes en ellos, existe una amplia gama de políticas y legislación de la Unión Europea (UE) sobre basura marina, fuentes de contaminación e impactos, así como también una serie de iniciativas de la UE relacionadas con la ya mencionada basura marina, incluyendo na-

noplasticos, con el fin de reducir la presencia de estas sustancias en el medioambiente. Hay que destacar también que, de manera general, estos productos, su composición y uso en contacto con los alimentos también son un área de trabajo regulado en la UE1. Por todas estas razones se concluye que un programa para el control de plásticos y MP deberá incluir varias estrategias de índole económico, educativo y regulatorio<sup>12</sup>.

### Referencias

1. Ministerio de consumo. MICROPLÁSTICOS Y NANOPLÁSTICOS [Internet]. España; 2021 Sep [cited 2023 Jan 31]. Available from: Update on EFSA's activities on Emerging Risks 2012-2013
2. Luis Miranda JM. Reacciones y sus mecanismos en la degradación de polímeros. [Ciudad de México]: Instituto Politécnico Nacional; 2015.
3. Thompson RC, Swan SH, Moore CJ, Vom Saal FS. Our plastic age. Vol. 364, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. Royal Society; 2009. p. 1973-6.
4. Carlos PI, Flores E. POLÍMEROS VS. PLÁSTICOS.
5. Castañeta G, Gutiérrez AF, Nacaratte F, Manzano, Carlos A. Microplastics: a Contaminant That Grows in All Environmental Areas, Its Characteristics and Possible Risks To Public Health From Exposure. Rev Bolív Química. 2020;37(3).
6. Thanya P, Ortiz Aguilar J. Épsilon Delta de las Ciencias UNA MIRADA HACIA LOS PLÁSTICOS. Vol. 11.
7. Ainali NM, Kalaronis D, Kontogiannis A, Evgenidou E, Kyzas GZ, Yang X, Bikiaris DN, Lambropoulou DA. Microplastics in the environment: Sampling, pretreatment, analysis and occurrence based on current and newly-exploited chromatographic approaches. Science of the Total Environment 2021, 794(148725), 1-34.
8. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias. Contaminación por microplásticos. Rev. Acad. Mex. Ciencias 2022, 73(2).
9. Wang W, Yuan W, Xu EG, Li L, Zhang H, Yang Y. Uptake, translocation, and biological impacts of micro(nano)plastics in terrestrial plants: Progress and prospects. Environ Res. 2022 Jan 1;203.
10. Mejía A, Escuela P, Panamericana A, Honduras Z. Evaluación del efecto de la incorporación de dos tipos de plásticos (biodegradable y convencional) y la actividad de lombrices en suelos arenosos en trigo (*Triticum aestivum* L.). 2017.
11. Hirissi K. Karapanagioti, Ioannis K. Kalavrouziotis. Microplastics in Water and Wastewater. IWA Publishing; 2019. Fragmento del trabajo con DOI:10.2166/9781789060034:0045
12. Schwabl P, Köppel S, Königshofer P, Bucsecs T, Trauner M, Reiberger T, Liebmann B. Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series. Ann Intern Med. 2019;171(7):453-7.
13. Cox KD, Covernton GA, Davies HL, Dower JF, Juanes F, Dudas SE. Human Consumption of Microplastics. Environ Sci Technol. 2019;53(12):7068-74.

# CONGRESO ANUAL RED OTT MÉXICO

SAVE THE  
**DAY**

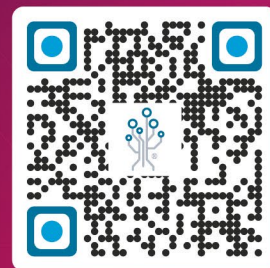
**2023**

**Ecosistemas de innovación  
sin fronteras: sustentabilidad  
y desarrollo económico**

**Evento Presencial**

**18 al 20**  
de Octubre 2023  
Irapuato, Gto

[congreso.redott.mx](http://congreso.redott.mx)



redOTT  
México

 Gobierno de Irapuato  
**CON PASO FIRME**



# Uso del sorgo (*Sorghum bicolor*) en la elaboración de productos libres de gluten

Melissa Rodríguez España, Claudia Yuritzi Figueroa Hernández, Patricia Rayas-Duarte, Mirna Leonor Suarez Quiroz, Zorba Josué Hernández Estrada  
Unidad de Investigación y desarrollo en Alimentos, TecNM campus Veracruz  
Av. Miguel Ángel de Quevedo 2779 Formando Hogar, C.P. 91897 Veracruz, Veracruz  
[zorba.he@veracruz.tecnm.mx](mailto:zorba.he@veracruz.tecnm.mx)

## Resumen

La demanda de productos panificados libres de gluten ha generado la necesidad de nuevas materias primas e ingredientes proteicos que le puedan otorgar la funcionalidad necesaria a dichos productos. Dentro de las propuestas más comunes para remplazar al gluten se han reportado la utilización de mezclas de almidones, hidrocoloides, emulsificantes, fibras e ingredientes proteicos que le puedan otorgar la funcionalidad tecnológica necesaria al pan. El sorgo es una fuente de carbohidratos, proteínas, ácidos fenólicos, minerales (como el magnesio, hierro y zinc) y vitaminas, principalmente del complejo B (ej. tiamina, riboflavina y niacina). El sorgo se considera un sustituto adecuado para la harina de trigo en las dietas celiacas, debido a que no contiene gluten. No obstante, el sorgo presenta limitaciones nutricionales y tecnológicas, debido a la ausencia de gluten y la presencia de ciertos compuestos como los taninos, ácido fítico e inhibidores de tripsinas, que dan como resultado productos rígidos, con texturas irregulares y quebradizas. Para contrarrestar estas desventajas se han explorado algunos pretratamientos

del sorgo que permiten la reducción de los compuestos antinutricionales, incrementan la disponibilidad de compuestos como el almidón y las proteínas, favorecen la creación de redes que capturan el CO<sub>2</sub> y mejoran las características tecnológicas y sensoriales del pan. En el presente artículo se aborda una revisión sobre el efecto de diferentes tratamientos en el sorgo, analizando las ventajas y desventajas a las que se enfrenta la utilización de este grano en la industria de la panificación.

## Palabras clave:

Sorgo, pretratamientos, propiedades reológicas, productos libres de gluten

## Introducción

El gluten es un conjunto de proteínas de almacenamiento que se encuentran en el endospermo de algunos cereales como trigo, centeno y cebada. El gluten es una mezcla compleja de proteínas (75 – 85 %) unidas por puentes disulfuros, principalmente gliadinas y gluteninas (Figura 1), 5 – 10 % de lípidos y el resto de almidón residual [1].

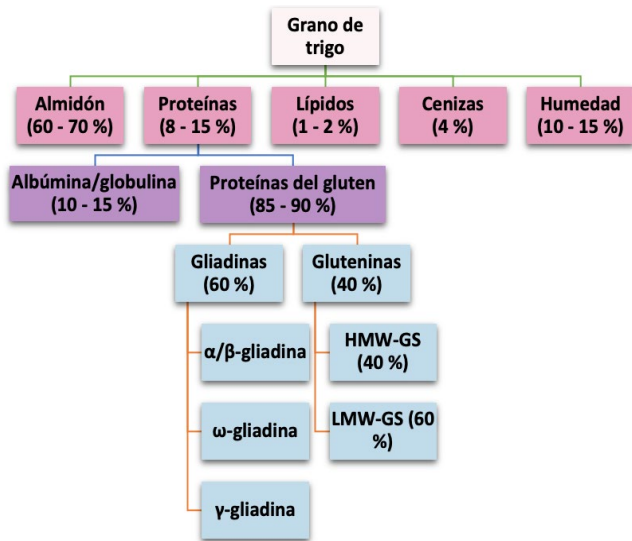


Figura 1. Composición del grano de trigo y su clasificación de proteínas. HMW-GS: Gluteninas de alto peso molecular; LMW-GS: Gluteninas de bajo peso molecular. Adaptado de [1, 2]

Las gliadinas y gluteninas son proteínas denominadas prolaminas, ricas en glutamina (38 %) y residuos de prolina (20 %), solubles en etanol acuoso (70/30, v/v) e insolubles en agua. Las prolaminas resultan de gran importancia tecnológica dentro de la industria alimenticia, porque al combinarse con el almidón y agua durante la hidratación y mezclado de la harina, forman redes tridimensionales. En esta mezcla compleja el gluten actúa como agente aglutinante y extensible, propiciando el desarrollo de masas fuertes, cohesivas, maleables (flexibles) y viscoelásticas (Figura 2A). Esto favorece la retención de agua y gases, productos de la fermentación, mejorando las cualidades sensoriales, que dan calidad al pan y a otros productos horneados como pasteles, pastas y galletas. Debido a lo anterior, los productos sin gluten presentan menor volumen, mayor dureza, estructuras de migas no deseables, entre otras, lo que da en consecuencia una baja aceptación del consumidor [3].

A pesar de la importancia tecnológica para los productos de panificación, en los últimos años el incremento de personas con patologías relacionadas a las proteínas del gluten ha abierto la búsqueda de nuevos productos libres de gluten. Dentro de los principales trastornos relacionados se encuentran las alergias y sensibilidad al gluten, además de trastornos autoinmunes que abarcan desde dermatitis herpetiforme y ataxia por gluten, hasta la enfermedad celíaca. La enfermedad celíaca o intolerancia permanente al gluten es una enfermedad autoinmune sistémica que se caracteriza por una absorción intestinal deficiente, seguida de la inflamación crónica y la atrofia de la mucosa del intestino delgado, la cual se manifiesta tras la ingesta del gluten en la dieta en ciertos individuos predispuestos genéticamente (Figura 2B). La Organización Mundial de Gastroenterología reporta que la prevalencia de la enfermedad celíaca en la población a nivel mundial varía entre 0.3 - 1 % pero solo una fracción (30 - 50 %) ha sido diagnosticada apropiadamente; mientras que en México se ha reportado que un 0.7 % de la población padece esta enfermedad. Algunos de los síntomas relacionados son la incapacidad para ganar peso, anorexia, anemia, desnutrición, distensión abdominal, diarrea, entre otras más graves como desórdenes autoinmunes (ej. diabetes tipo 1, osteoporosis, infertilidad), desarrollo de síndrome linfoproliferativo autoinmune y cáncer gastrointestinal [4]. Actualmente, el único tratamiento eficaz que existe es una dieta estricta libre de gluten de por vida.

Por otro lado, las dietas libres de gluten carecen de compuestos como aminoácidos esenciales, vitaminas y minerales, y suelen presentar excesos de azúcares, lípidos

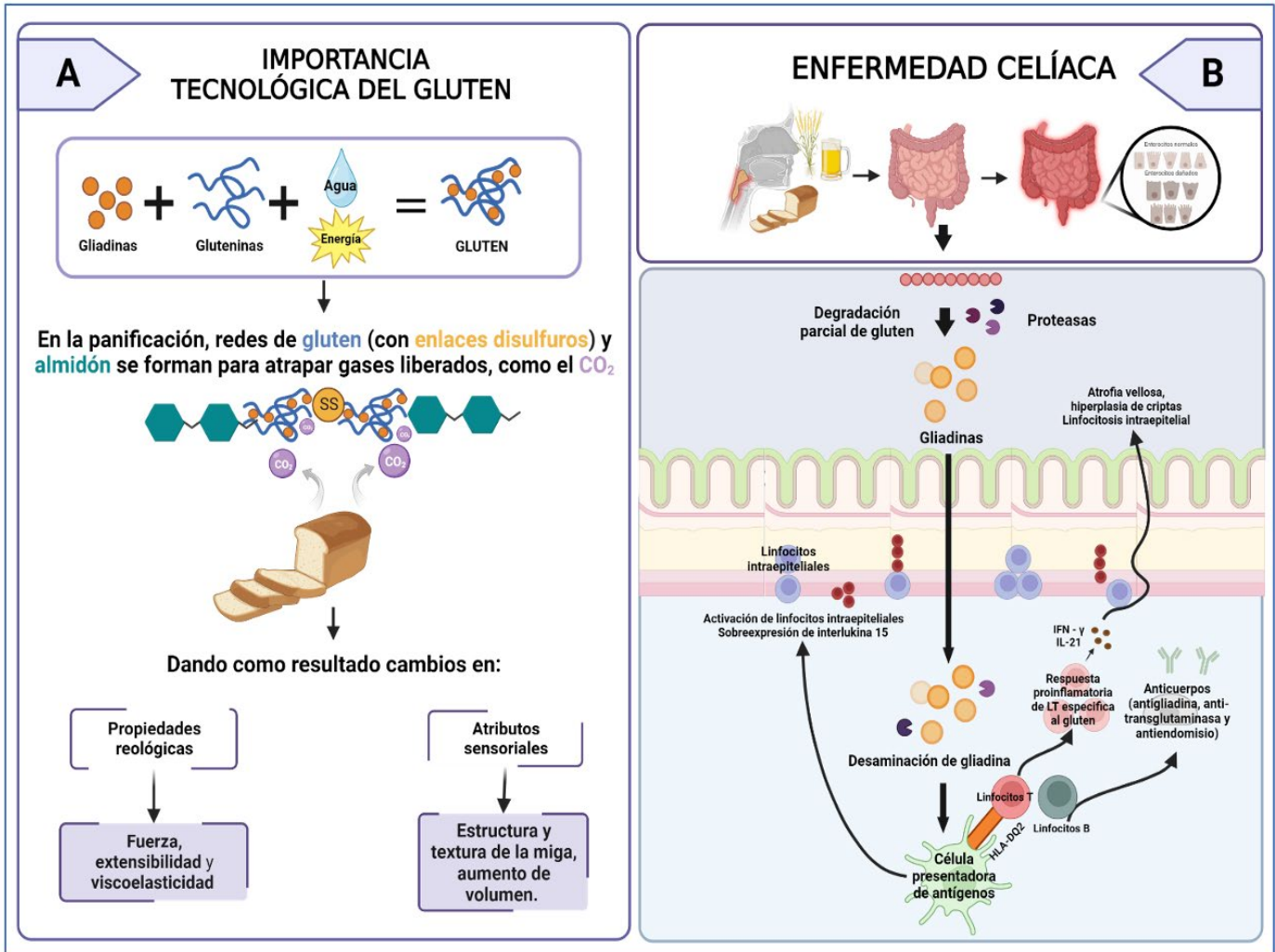


Figura 2A. Composición del gluten y su importancia a nivel tecnológico.  
2B. Mecanismo de acción del gluten en la enfermedad celíaca

y sodio, causando un desequilibrio en el contenido nutricional. Es por ello que, actualmente, las materias primas para el desarrollo de productos libres de gluten se ha enfocado al uso de otros cereales (ej. arroz, maíz, mijo y sorgo), los cuales permiten aumentar la retención de agua y ejercer un efecto positivo sobre los parámetros nutricionales y tecnológicos de la masa como textura, volumen y calidad de la miga, y pseudocereales (amaranto, garbanzo y trigo sarraceno) los cuales aportan, principalmente, aminoácidos y ácidos grasos esenciales y minerales [5].

**“Actualmente, las dietas libres de gluten son el único tratamiento para la enfermedad celíaca”.**

### El cereal

El sorgo es el 5º cereal más importante del mundo. Al igual que el maíz y la caña de azúcar, el sorgo es una planta clasificada como C4. La ruta metabólica C4 permite que el CO<sub>2</sub> de la atmósfera sea capturado y fijado en dos compartimentos diferentes: primero dentro de células especializadas llamadas mesofílicas, en donde es fijado como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> por la anhidrasa carbónica,

## Perfil nutricional del sorgo



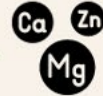
Fuente de vitaminas, principalmente del complejo B



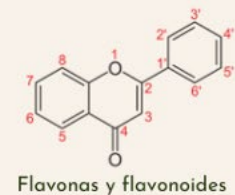
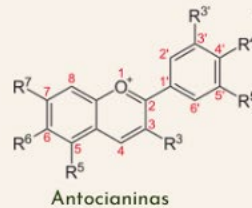
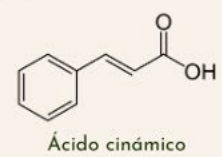
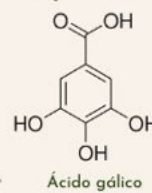
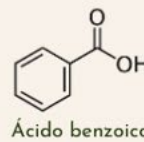
Alto contenido de fibra dietética, almidón resistente y proteínas



Fuente de calcio, hierro, zinc, magnesio y potasio.



Fuente de compuestos fenólicos



## Beneficios a la salud

Capacidad antioxidante

Prevención del cáncer

Capacidad antiinflamatoria

Índices glucémicos bajos

Prevención de diabetes y obesidad

Prevención de enfermedades cardiovasculares



## Aplicaciones

Alimentos y bebidas

Biocombustibles

Alimento para ganado

para ser tomado por la enzima PEPc, la cual permite incorporar el carbono en un ácido C4. Posteriormente, el C4 es transportado por los ATP al segundo compartimiento y da lugar a la descarboxilación de este, generando una alta concentración de CO<sub>2</sub> en las células de la planta e inhibiendo de

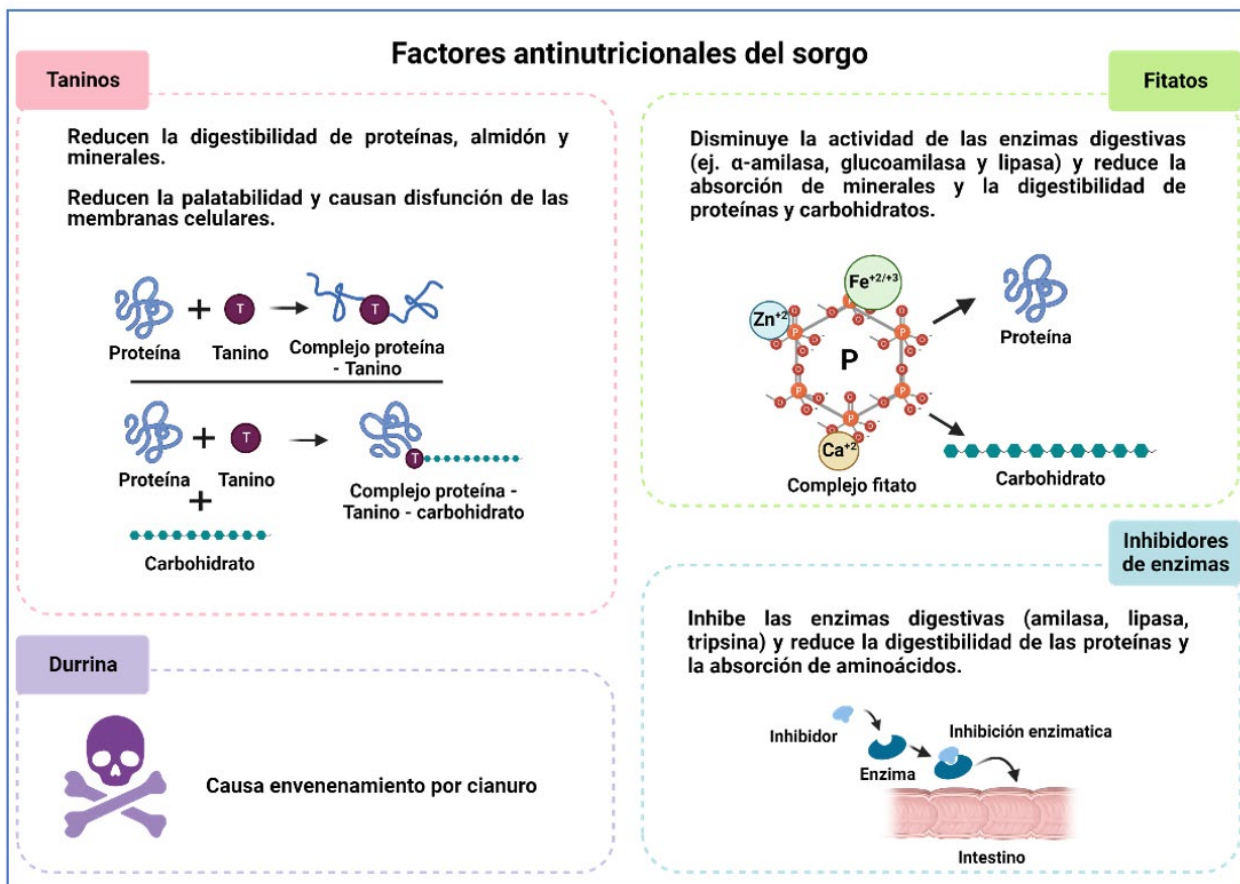
esta manera la fotorrespiración. Esta clasificación permite que el sorgo crezca en climas cálidos con una alta intensidad de luz, soporte el estrés hídrico y presente mayor eficiencia en términos de agua y utilización de CO<sub>2</sub> [6, 7].

A nivel mundial, la producción total de sorgo está destinada un 31 % a la producción de alimentos y bebidas, y el resto a la producción de alimento para animales, biocombustibles y fertilizantes. El sorgo es una excelente fuente de carbohidratos (75 – 79 %), proteínas (9.1 – 14.1 %), compuestos fitoquímicos (ej. ácidos fenólicos y flavonoides), vitaminas, principalmente del complejo B (ej. tiamina, riboflavina y niacina) y minerales (ej. calcio, magnesio, hierro, potasio y zinc) [8]. Dicha composición nutricional, junto a su perfil fenólico rico en compuestos como el ácido benzoico, ácido cinámico, flavonas y proantocianidinas, le confieren al sorgo múltiples beneficios a la salud como prevención de diabetes y obesidad, reduc-

ción de colesterol, prevención de enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Figura 3) [9-11].

*“El sorgo puede ser un sustituto del trigo en las dietas de pacientes celíacos debido a que no contiene gluten”.*

Sin embargo, el sorgo presenta limitaciones nutricionales y tecnológicas, debido a la presencia de ciertos compuestos como los taninos, ácido fítico, inhibidores de tripsinas y durrina, los cuales forman complejos que disminuyen la digestibilidad, biodisponibilidad y solubilidad de compuestos de interés (ej. proteínas) en las matrices alimentarias (Figura 4).





## Tecnologías aplicadas para la reducción de factores antinutricionales en el sorgo

Para contrarrestar estas desventajas se ha explorado la implementación de diferentes tecnologías tales como tratamientos con calor, hidrólisis, germinación, fermentación (acidoláctica, alcohólica, y ácido-acética), entre otras. En la Figura 5 se presentan algunas de las tecnologías mayormente utilizadas, las cuales ejercen un efecto positivo sobre las propiedades nutricionales del sorgo; Además de permitir desarrollar productos alimenticios que puedan ser competitivos en el mercado [10, 12].

La inmersión de granos en agua (soaking) y la germinación son métodos que permiten la activación de enzimas endógenas presentes de forma natural en los cerea-

les (como las fitasas) y con ello ejercer un efecto positivo sobre la estructura de los alimentos, disminuyendo compuestos antinutricionales, como el ácido fítico, taninos y oxalato en un 40, 16 y 49 % respectivamente, aumentando la biodisponibilidad de compuestos, como las proteínas y minerales (como el hierro y el zinc).

Aunque la molienda es siempre necesaria para la elaboración de la harina, se necesita enfatizar que harinas con menor tamaño de partícula suelen producir panes con mayor volumen, y estructura de la miga, color y textura más aceptable. Si eliminamos el pericarpio, también removeremos antinutrientes como el ácido fítico y taninos, con la desventaja de eliminar compuestos de interés como minerales, fenoles y fibra dietética, que se encuentran en el pericarpio [13, 14].

## Algunas tecnologías empleadas para la reducción de factores antinutricionales

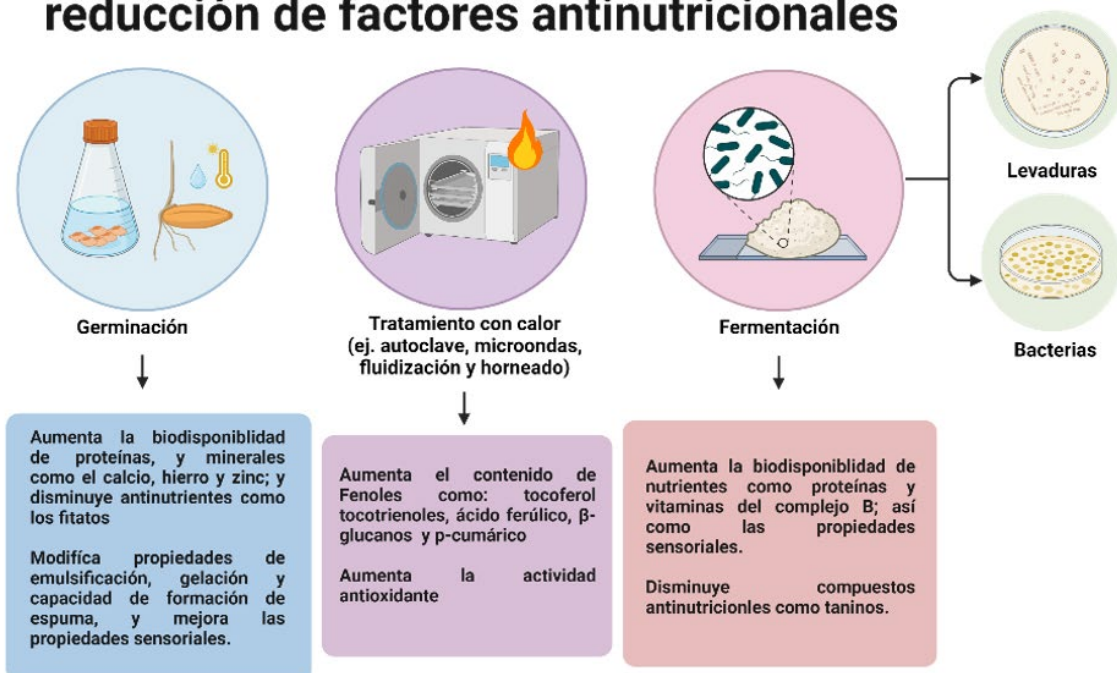


Figura 5. Algunas tecnologías aplicadas para la reducción de factores antinutricionales en el sorgo

Los métodos de calor, como la autoclave y cocción son, por su parte, métodos que de igual forma permiten la activación de enzimas (ej. fitasas), reducción de compuestos antinutricionales (ej. taninos, ácido fítico e inhibidores de tripsina), incrementan la calidad y digestibilidad de compuestos como proteínas y almidón, y aumentan la acidez del grano [15].

La fermentación es un proceso catabólico de oxidación incompleta, siendo el producto final un compuesto orgánico. Es uno de los métodos más utilizados para aumentar la digestibilidad de los alimentos y mejorar su perfil de aminoácidos. Se ha reportado que la fermentación del sorgo activa enzimas exógenas y endógenas como la fitasa y tanasa, que permiten disminuir antinutrientes como inhibidores de tripsina, inhibidores de amilasa, taninos y ácido fítico hasta un 58, 75, 56.9 y 50 % respectivamente, y aumentar la biodisponibilidad de minerales (ej.  $Zn^{+2}$ ,  $Fe^{+2/+3}$  y  $Ca^{+2}$ ). En consecuencia, los productos fermentados presentan mejores propiedades reológicas, tecnológicas y sensoriales respecto a los productos no fermentados. Dentro de los microorganismos que juegan un papel importante en la fermentación de cereales se encuentran las bacterias ácido lácticas, como *Lactobacillus spp.*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus fermentum* y *Streptococcus spp.*, y levaduras, como *Saccharomyces cerevisiae* [16, 17].

### Aplicación del sorgo en la industria alimentaria

El sorgo se ha utilizado como materia prima en África y Asia para la fabricación de alimentos tradicionales (ej. papillas) y bebidas (ej. cervezas tradicionales, vino, y bebidas no alcohólicas). La incorporación de niveles significativos de la harina de sorgo en

las masas con y sin gluten se ha utilizado para la formulación de productos a base de cereales. Sin embargo, debido a la falta de proteínas de gluten, la incorporación del sorgo también ocasiona una estructura de la miga no uniforme (celdas de aire muy pequeñas y una mayor densidad del pan), altos niveles de dureza, menor volumen y características sensoriales no atractivas para el consumidor [18].

Debido al desafío que esto conlleva se han estudiado diferentes formulaciones y estrategias tecnológicas que permitan superar los inconvenientes asociados a la falta del gluten en los productos panificados. Entre las estrategias evaluadas se encuentra la adición de hidrocoloides (ej. goma xantana, derivados de celulosa), enzimas (ej.  $\alpha$ -amilasa), emulsificantes, almidones nativos (ej. almidón de papa), almidones pregelatinizados, harinas (ej. harina de arroz, harina de maíz), ingredientes libres de gluten (ej. proteína de leche, huevo), y la utilización de harinas extruidas, germinadas y/o fermentadas con bacterias ácido-lácticas (ej. masa madre), entre otros [19].

Dentro de los usos del sorgo en la industria de la panificación se ha evaluado el efecto de diferentes proporciones de harina de sorgo para la producción de panes libres de gluten junto con otros cereales (ej. maíz, arroz), almidones (ej. maíz, tapioca, entre otros) y aditivos (ej. hidroxipropilmetilcelulosa, goma xantana) y se ha observado que los panes elaborados con un porcentaje de harina de sorgo de hasta el 70 % presentaban niveles aceptables de volumen específico y textura de la miga. Estas características fueron atribuidas al contenido de proteínas solubles, solubilidad y poder de hinchamiento de los gránulos de almidón.

También se ha observado que este tipo de panes libres de gluten tienen mayor absorción, por lo que requieren un mayor contenido de agua y la adición de estabilizadores e hidrocoloides. Asimismo, se ha estudiado el uso de harina de sorgo como una alternativa más económica y saludable para la

elaboración de pastas y tallarines libres de gluten. Se ha reportado que, debido a las características de gelatinización y retrogradación del almidón del sorgo, sus propiedades de extrusión resultan ser excelentes y similares a las reportadas para el maíz y el arroz. También se resalta que debido

a que el sorgo es rico en vitaminas B, fibras dietéticas y aminoácidos, como lisina (6.01 %) e histidina (3.04 %) y aminoácidos que contienen azufre (5.41 %), se ha evaluado el uso de sorgo en la preparación de alimentos para bebés [20].

Otros productos que se han reportado a base de harina de sorgo son: tortillas, pastas y galletas. Actualmente, marcas como Bob's Red Mill® han incluido la harina de sorgo dentro de sus formulaciones comerciales para productos libres de gluten. En la Figura 6 se presenta una receta propuesta por la marca para la elaboración de pan de caja o pan de sándwich libre de gluten a base de harina de sorgo y arroz, y aditivos como goma xantana y polvo para hornear.

*Receta:*  
**Pan De Sándwich libre de Gluten**

**1** 1/4 TAZA AZUCAR  
1/2 TAZA DE AGUA TIBIA  
4 CUCCHARADITAS DE LEVADURA  
MEZCLAR Y REPOSAR DURANTE 5 MINUTOS,

**2** 2 1/2 TAZAS DE HARINA DE SORGO  
1/2 TAZA DE HARINA DE ARROZ INTEGRAL  
3 CUCCHARADAS DE GOMA XANTANA  
2 CUCCHARADITAS DE POLVO DE HORNEAR  
1 1/4 CUCCHARADITA SAL  
MEZCLAR

**3** 4 HUEVOS  
1/4 TAZA DE ACEITE DE OLIVA  
BATIR DURANTE 5 MINUTOS CON LA MEZCLA PASO 1. AGREGAR 1/2 TAZA DE AGUA TIBIA DE SER NECESARIO PARA OBTENER UNA MASA PEGAJOSA

**4** FERMENTAR A TEMPERATURA CÁLIDA HASTA QUE DUPLIQUE SU TAMAÑO

**5** HORNEAR A 206 °C DURANTE 45 MINUTOS

**6** ¡DISFRUTA TU PAN!

Figura 6. Receta del pan de Sándwich sin gluten utilizando harina de sorgo y harina de arroz

## Conclusión

El sorgo es un sustituto prometedor de la harina de trigo en las dietas libres de gluten para pacientes con enfermedad celiaca y enfermedades afines. Se ha observado que la aplicación de pretratamientos tiene un efecto positivo sobre la composición nutricional, aumentando la biodisponibilidad de compuestos como proteínas, almidones, minerales, y reduciendo sus compuestos antinutricionales, como los taninos, ácido fítico e inhibidores de enzimas. Esto, a su vez, presenta un efecto positivo sobre las características tecnológicas y sensoriales de los productos finales. Tras ello, se han encontrado resultados positivos en la adición del sorgo en matrices de productos como panes, pastas, galletas y alimentos infantiles. Sin embargo, aún es necesario seguir explorando la aplicación del sorgo pretratado en diferentes formulaciones con otros cereales, pseudocereales e ingredientes tales como almidones, gomas e hidrocoloides, y evaluar no solo sus características fisicoquímicas, reológicas, tecnológicas y sensoriales, sino que también presenten una composición nutricional adecuada para las dietas de pacientes celíacos.

## Referencias

1. Biesiekierski, J.R., What is gluten? *Journal of gastroenterology and hepatology*, 2017. 32: p. 78-81.
2. Islam, S., et al., Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2019. 6(3): p. 279-287.
3. El Khoury, D., S. Balfour-Ducharme, and I.J. Joye, A Review on the Gluten-Free Diet: Technological and Nutritional Challenges. *Nutrients*, 2018. 10(10).
4. Ohlund, K., et al., Dietary shortcomings in children on a gluten-free diet. *J Hum Nutr Diet*, 2010. 23(3): p. 294-300.
5. Abdel-Aal, E. and E. Gallagher, *Gluten-free food science and technology. Functionality of Starches And Hydrocolloids in Gluten-Free Foods*, Wiley-Blackwell, Chichester, 2009: p. 200-224.
6. Abah, C.R., et al., *Sorghum Grains: Nutritional Composition, Functional Properties and Its Food Applications*. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 2020: p. 101-111.
7. Serna-Saldivar, S.O., *Cereal grains. Properties, Processing, and Nutritional Attributes*. 1st ed, ed. G.V. Barbosa-Cánovas. 2010, Boca Raton: CRC Press.
8. Rooney, L.W., W.L. Rooney, and S.O. Serna Saldivar, Sorghum, in *Reference Module in Food Science*. 2016, Elsevier.
9. Dykes, L. and L.W. Rooney, Sorghum and millet phenols and antioxidants. *Journal of Cereal Science*, 2006. 44(3): p. 236-251.
10. Aruna, C. and K.B.R.S. Visarada, Other industrial uses of sorghum., in *Breeding sorghum for diverse end uses*, C. Aruna, et al., Editors. 2018, Woodhead Publishing. p. 271-292.
11. Dai, J. and R.J. Mumper, Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 2010. 15(10): p. 7313-52.
12. Taylor, J.R.N. and K.G. Duodu, in *Sorghum and Millets (Second Edition)*, J.R.N. Taylor and K.G. Duodu, Editors. 2019, AACC International Press. p. xiii-xiv.
13. Gupta, R.K., S.S. Gangoliya, and N.K. Singh, Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micro-nutrients in food grains. *J Food Sci Technol*, 2015. 52(2): p. 676-84.
14. Kumari, D., A. Chandrasekara, and F. Shahidi, Bioaccessibility and antioxidant activities of finger millet food phenolics. *Journal of Food Bioactives*, 2019. 6.
15. Rehman, Z.-u. and W. Shah, Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes. *Food chemistry*, 2005. 91(2): p. 327-331.
16. Kaur, K.D., et al., Significance of coarse cereals in health and nutrition: a review. *J Food Sci Technol*, 2014. 51(8): p. 1429-41.
17. Ray, M., et al., Folk to functional: an explorative overview of rice-based fermented foods and beverages in India. *Journal of Ethnic Foods*, 2016. 3(1): p. 5-18.
18. Taylor, J.R., T.J. Schober, and S.R. Bean, Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal of cereal science*, 2006. 44(3): p. 252-271.
19. Collar, C., Chapter 11 - Gluten-Free Dough-Based Foods and Technologies, in *Sorghum and Millets (Second Edition)*, J.R.N. Taylor and K.G. Duodu, Editors. 2019, AACC International Press. p. 331-354.
20. Adiamo, O.Q., O.S. Fawale, and B. Olawoye, Recent trends in the formulation of gluten-free sorghum products. *Journal of Culinary Science & Technology*, 2018. 16(4): p. 311-325.



# Útero didelfo bicollis: reporte de caso

**Karen Marlene Ortiz Pérez, Alejandro Arturo Solano Gómez**

Servicio Médico Integral de la Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional Salvador Díaz Mirón, Miguel Hidalgo, Casco de Santo Tomas, 11340 Ciudad de México  
[karen\\_marlene\\_ortiz@hotmail.com](mailto:karen_marlene_ortiz@hotmail.com)

## Introducción

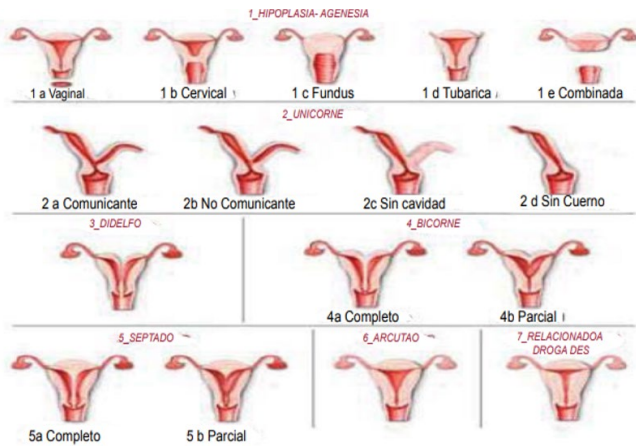
Se trata de un defecto congénito que, en la mayoría de los casos, pasa inadvertido dentro de la práctica clínica de rutina (como en un principio ocurrió en el caso que aquí presentamos). Si bien es cierto que el 70 % de las pacientes con útero didelfo bicollis logran embarazos exitosos, el 20 % no llegan al término y el 10 % presentan crecimiento intrauterino retardado. De ahí la importancia de su correcto diagnóstico temprano en todos los niveles de atención. Es importante remarcar que los casos de útero didelfo tienen los mejores resultados de embarazo, dentro de las anomalías uterinas, además de tener también un mejor pronóstico. Sirva el presente caso de estudio para dar a conocer esta importante y poco conocida condición médica.

**Anatomía:** Las anomalías congénitas del útero derivan de diversas alteraciones del conducto de Müller. La ausencia del factor antimülleriano y la persistencia del factor genético antitestes permiten el desarrollo pleno de los órganos derivados del conduc-

to de Müller. Este órgano, al principio de la conformación bilateral, se fusiona en su parte media y distal, y da origen al útero y la porción superior de la vagina. La estructura cavitaria y tubular se logra cuando el tabique medio resultante de la fusión se reabsorbe completamente. En la porción superior y lateral de los conductos permanecen separados y dan lugar a las estructuras de los oviductos o trompas de Falopio.

**Anomalías:** Existen dos cavidades uterinas separadas por un tabique sagital completo seguido, generalmente, de un tabique vaginal (también completo). Esta malformación puede ser asimétrica, lo que da lugar a una cavidad uterina con dimensiones normales y en el lado contralateral existe solo una formación rudimentaria (cuerno uterino rudimentario).

**Útero Subsepto Unicollis:** El tabique uterino sagital es incompleto y de diferente longitud cuando la anomalía es más leve, y solo forma un esbozo de tabicamiento anteroposterior en el fondo (útero arqueado).



**Útero bicorne:** Esta anomalía se descubre en la histerosalpingografía, donde en el fondo uterino se observa un reborde engrosado anteroposterior que insinúa la formación de dos cavidades uterinas que se proyectan hacia ambos lados, y que termina en la inserción de tubería en forma más o menos puntiaguda. Si se observa el fondo uterino por la parte externa puede identificarse un surco o una depresión anteroposterior que marca la separación de los dos cuernos uterinos.

### Síntomas y embarazo

Estas anomalías uterinas cursan asintomáticas y después de la menarquía pueden ocasionar trastornos en la menstruación o dismenorrea intensa, crónicamente evolutiva. Si la paciente tiene vida sexual activa puede sufrir dispareunia y esterilidad, y si ocurre el embarazo las complicaciones son frecuentes, con abortos de repetición, prematuridad, distocias dinámicas y hemorragias durante el parto. Algunas pacientes pueden tener embarazos normales e incluso dar a luz por parto vaginal, pues depende de la naturaleza del defecto y de la magnitud del mismo.

Cuando estas alteraciones uterinas perturbaban la fertilidad está indicado el tratamiento quirúrgico, con metroplastias en las que se reseca el tabique y se restaura anatómica-

mente la cavidad uterina que permite el embarazo, pero no el parto, aconsejando la cesárea electiva. Cuando existe un cuerno rudimentario se aconseja su extirpación quirúrgica, en virtud de las complicaciones hemorrágicas que pueden ocurrir en los eventos reproductivos.

**Factor consciente:** Desde el punto de vista antropológico es evidente que la sexualidad constituye una dimensión especial de la conducta humana que aparece unida a la función reproductiva.

### Presentación de caso

Se trata de una paciente femenina de 21 años, procedente de la zona norte de Ciudad de México. Presenta prueba de embarazo positiva (de una semana anterior) con aproximadamente 9 semanas de gestación por fecha de última menstruación el día 5 de enero del 2023. Sin controles prenatales, sin antecedentes personales de importancia. Refiere ciclos menstruales irregulares de intervalo de 28-34 días, con duración de cuatro a ocho días, menarquía a los 11 años, vida sexual activa a los 15 años. Con ultrasonido a las 10 semanas de gestación por evento incidental respecto a una caída con traumatismo sacro y coccígeo leve tres días anteriores al 16 de marzo del 2023 y sangrado activo de tres días de evolución. Acudió a Servicio Médico integral, con dolor de tipo obstétrico que se irradiaba a región lumbar de 36 horas de evolución.

En la exploración física, con signos estables. Altura de fondo uterino de 7 cm con actividad uterina detectable por clínica, sin datos de frecuencia cardíaca fetal, a la especuloscopia se observa salida de líquido transvaginal con contenido hemático no fétido y se visualiza una partición vaginal y doble cérvix respectivamente, datos laboratoriales sin relevancia.

Se decide realizar ultrasonido pélvico posterior a la exploración, con hallazgo que corresponde a útero didelfo defecto mülleriano y útero no ocupado. Dados los hallazgos clínicos y radiológicos se evidencia útero didelfo, el cual, por aborto, ya no se encuentra ocupado. La paciente mantiene seguimiento en consulta del servicio de ginecología y se mantiene bajo tratamiento por la hemorragia que presenta. Acude cada cinco días a revisión y se elabora el alta dentro del Servicio Médico Integral. Es referida a Unidad Médica Alta Especialidad, para su valoración por método de salpingografía, y normar conducta terapéutica y quirúrgica para probables embarazos a futuro.

### Discusión

Las malformaciones de los conductos müllerianos son un grupo de entidades que resultan de la falla en el desarrollo de los conductos paramesonéfricos. En el caso del útero didelfo, cada conducto se desarrolla de forma independiente, alcanzando un tamaño casi normal y con la presencia de dos cérvix. En nuestro caso, la gestación evolucionó en el cuerpo mejor desarrollado. La complicación más temible es la rotura uterina, que se produce a nivel del punto de unión de los dos cuerpos uterinos alrededor de las 28 semanas de gestación, según lo establece Hoffman.

Las técnicas de imagen son esenciales para el diagnóstico, tratamiento y consejo reproductivo en pacientes con anomalías del conducto de Müller. La ultrasonografía pélvica fue usada como método diagnóstico inicial, mostrando una alta especificidad en el diagnóstico de malformaciones müllerianas, tal como está descrito en la literatura.

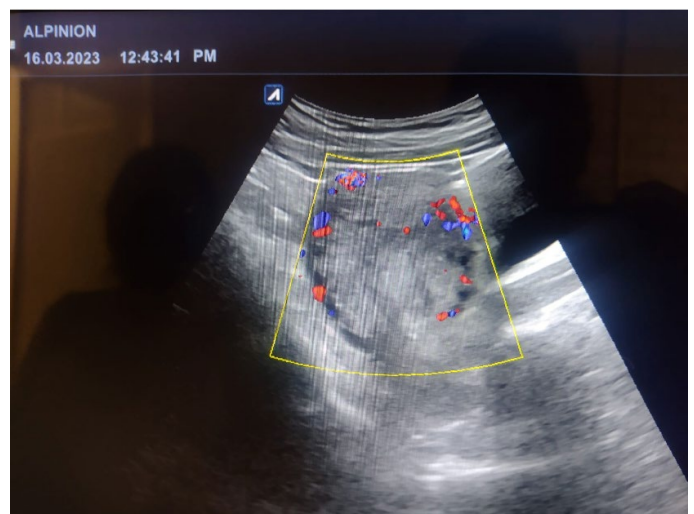
El tratamiento quirúrgico en pacientes con malformaciones müllerianas estaría limitado a aquellas mujeres con abortos a repetición, y en los casos de pacientes con dolor pélvico crónico (una vez que se ha confirmado por laparoscopia que no existe endometriosis). Hoy en día se utiliza la reconstrucción con metroplastia de Strassman, que suele mejorar los resultados reproductivos de estas mujeres.

### Agradecimientos

Con sincero agradecimiento a nuestra paciente M.V., quien nos motivó a aprender y reforzar los conocimientos sobre los últimos tratamientos y métodos de diagnóstico. Deseamos que encuentre en este camino de aprendizaje el tratamiento que sea el indicado para ella.

### Referencias

1. Escalona-García B, Pichardo-Cuevas M, Miranda-Rodríguez JA, Ramírez-Montiel ML, Contreras-Carreto NA (2012) Malformaciones müllerianas e infertilidad femenina. *Rev. Invest Med Sur Mex* 19: 200-202.
2. José Antonio Sereno Coló, 2013 Ginecología, guía actualizada para la práctica clínica, Universidad michoacana de San Nicolas de Hidalgo, edición y Farmacia José Antonio Sereno Colo.





# Aplicación de los nanomateriales en la mejora de autopartes: inicio de una nueva era en el desarrollo de automóviles

Rafael Álvarez Chimal<sup>1</sup>, Rosario Tavera Hernández<sup>2</sup> y Jesús Ángel Arenas Alatorre<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Materia Condensada, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Coyoacán, 04510, México

<sup>2</sup> Departamento de Productos Naturales, Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Coyoacán, 04510, México

[ac.rafael.11@gmail.com](mailto:ac.rafael.11@gmail.com)

## Resumen

Los nanomateriales son materiales extremadamente pequeños, con dimensiones que se encuentran en el rango de 1 a 100 nanómetros. Esto les permite tener propiedades ópticas, eléctricas, magnéticas y mecánicas únicas, lo que los hace ideales para su empleo en la fabricación de automóviles. Dentro de la gran cantidad de autopartes que conforman un vehículo, los nanomateriales pueden aplicarse para mejorar todas ellas: varias partes del motor, estructura del automóvil, pintura, neumáticos, interiores, luces, parabrisas, baterías y componentes electrónicos, aunado al costo/beneficio que trae su implementación. Todo lo anterior tiene por objeto desarrollar vehículos más resistentes, seguros, ligeros y que disminuyan o eviten por completo la emisión de

contaminantes. Con el uso de nanomateriales se pretende llevar a los automóviles a una nueva era.

## Palabras clave:

Nanomateriales, autopartes, vehículos eléctricos, semiconductores, modernidad, ambiente y tecnología.

## Introducción

En la industria automotriz, los nanomateriales forman parte importante de los diferentes componentes que constituyen a los automóviles. Algunos ejemplos incluyen los que se encuentran en las piezas del motor, principalmente, para evitar su desgaste y mejorar su eficiencia. Estos son materiales ligeros (que favorecen al ahorro y aprovechamiento de combustible), pero al mismo



tiempo resistentes para soportar impactos. También, los nanomateriales se adicionan a los neumáticos, pinturas y recubrimientos (lo que permite reducir el daño por lluvia o calor). En partes electrónicas, como las baterías y los convertidores catalíticos, se usan para mejorar su eficiencia y disminuir las emisiones contaminantes. Por sus características, el objetivo que tienen estos materiales es mejorar las diferentes piezas que conforman a los automóviles, implicando un beneficio en el desarrollo de este, así como la optimización y beneficios en el ahorro en costos de producción.

### Los nanomateriales en la industria automotriz

Los nanomateriales poseen tamaños que se encuentran en el rango de 1 a 100 nm<sup>1</sup> [Figura 1]. Estos materiales han adquirido importancia e interés en los últimos años debido a la gran cantidad de aplicaciones que tienen, ya que la materia a esa escala presenta un acomodo más compacto de átomos y moléculas, lo que genera que se presenten fenómenos y propiedades óp-

ticas, magnéticas o eléctricas totalmente diferentes a sus homólogos macroscópicos<sup>2</sup>. Nanoestructuras como el grafeno, nanotubos de carbono, nanoarcillas, nanopartículas, nanopolímeros y nanorecubrimientos han sido estudiadas y aplicadas en la industria automotriz, buscando satisfacer las altas demandas de que existe en esta área: mejoramiento del desempeño del motor, seguridad, neumáticos, equipos de alta resolución, sensores, autopartes más ligeras, vehículos más durables e inteligentes. Aunado a esto, se busca reducir o eliminar la emisión de contaminantes y disminuir los costos de producción [Figura 2]<sup>3</sup>.

### ¿Dónde se aplican los nanomateriales en los motores?

En la actualidad, los motores tienen componentes que los hacen más pequeños y ligeros, pero con la capacidad de ser más potentes. Los nanomateriales que se están usando para lograr estas características, como los nanotubos de carbono, favorecen una mayor resistencia (comparado con el acero), pero con las características de ser más ligero

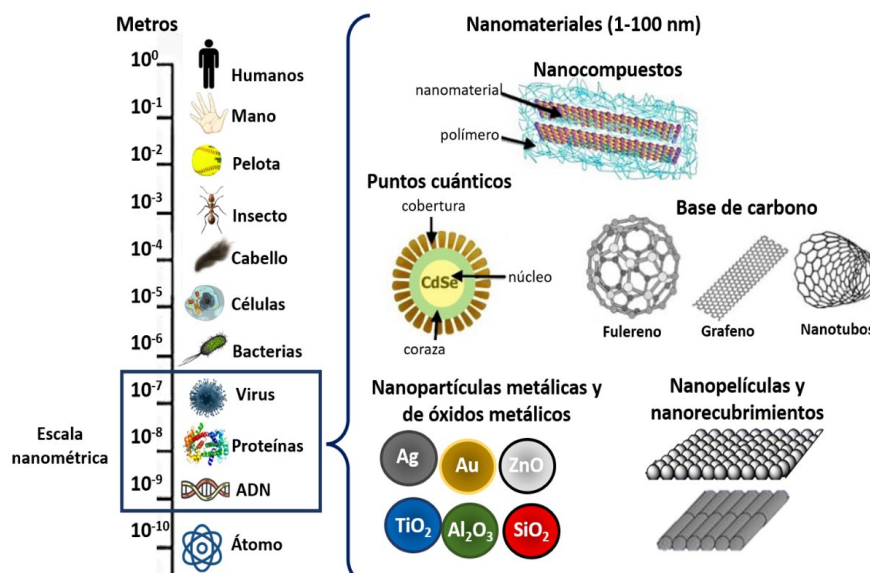


Figura 1. Escala nanométrica y algunos nanomateriales

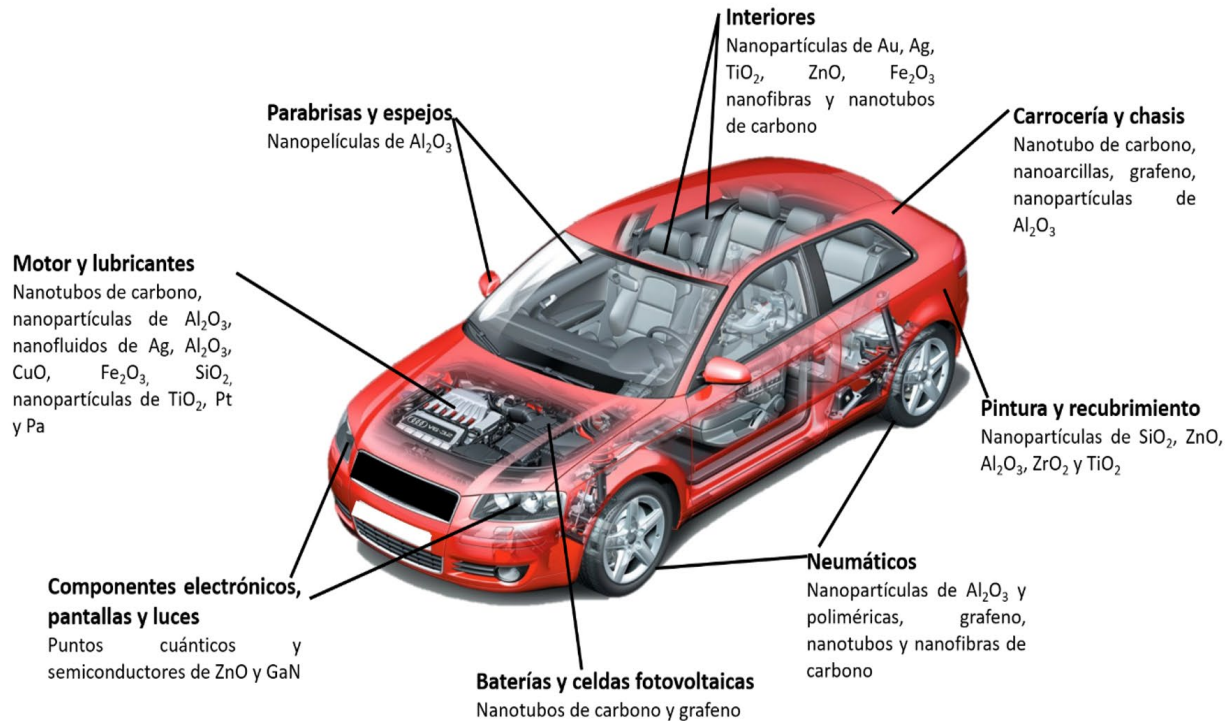


Figura 2. Los nanomateriales más usados en las diferentes partes de un automóvil

que el aluminio (además de que soportan las altas temperaturas que se generan durante su desempeño<sup>4</sup>).

Otras alternativas que existen son los recubrimientos con nanopelículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  en las paredes de los cilindros para minimizar el calor generado por la fricción y un aumento del trabajo, haciéndolos más eficientes<sup>5,6</sup>. Las nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mejoran la conductividad térmica entre un 4.2 y 4.5 % en los motores a temperaturas que van de los 30 a los 50 °C. Además, el aumento de la concentración de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en el anticongelante mejora la refrigeración del motor<sup>7</sup>.

La adición de nanofluidos que contienen nanopartículas de Ag,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CuO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  suspendidas en agua, aceite de motor o el combustible ayudan a mejorar la conductividad térmica y contribuyen a

reducir las emisiones de contaminantes como los  $\text{NO}_x$  y el CO hasta en un 13 y un 20.5 %, respectivamente<sup>8</sup>.

El uso de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , Pt y Pd en los convertidores catalíticos beneficia la reducción de contaminantes<sup>9</sup>. Mazda, por ejemplo, modificó un catalizador incrustando nanopartículas metálicas para reducir entre un 70 y un 90 % el empleo de metales como el Pd y el Pt<sup>10</sup>. Asimismo, Toyota introdujo un compuesto de nailon con nanoarcillas en las bandas del engranaje de distribución, logrando una mayor estabilidad y resistencia al calor<sup>11</sup>.

### Los neumáticos, ¿cómo se benefician?

Para garantizar el funcionamiento seguro de los automóviles es necesario adoptar neumáticos basados en nanomateriales. El rendimiento de éstos está influenciado

por la composición de la capa exterior, de modo que los materiales que se encuentren bajo ese revestimiento tengan una vida útil más larga<sup>12</sup>.

El uso de nanopartículas poliméricas, grafeno, nanofibras y nanotubos de carbono en compuestos de caucho aumenta la seguridad y durabilidad de los neumáticos<sup>13</sup>. También, la adición de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  al caucho mejora la resistencia al desgaste hasta en un 800 %, comparado con los neumáticos tradicionales<sup>14</sup>.

### En la carrocería y el chasis también son utilizados

Debido a que los nanomateriales tienen propiedades que los hacen más ligeros y resistentes, estos resultan ser importantes para reducir el peso de los vehículos. Esta acción los hace más seguros de conducir, además de que aumenta la eficiencia del combustible, reduce la emisión de contaminantes al ambiente y otorga una mayor protección contra choques<sup>3</sup>.

El uso de nanomateriales impacta en el costo total directo del vehículo, reduciendo los precios por la disminución del peso y los procesos de producción. Por ejemplo, los nanotubos de carbono, grafeno, nanoarcillas de poliamidas, Mg, Al y Si son más ligeros en cuanto a peso y tienen propiedades térmicas superiores a los que se comercializan actualmente a base de metales y plásticos, lo que mejora la resistencia general y la durabilidad de los automóviles<sup>15,16</sup>.

El chasis (que es un ejemplo de esto) es la estructura o armazón de carga de un vehículo, es decir, el esqueleto que soporta estructuralmente el peso de los componentes del automóvil y los ocupantes. Por sus

características, el chasis debe ser ligero y lo suficientemente resistente para soportar todo el equipo que se monte sobre él<sup>17</sup>.

Por su parte, el grafeno (capa bidimensional de átomos de carbono entramados hexagonalmente) es uno de los nanomateriales más usados en la industria automotriz. Los automóviles en los que se utiliza grafeno son mucho menos pesados y más resistentes (hasta 200 veces más) que el acero, fibra de carbono y componentes de aluminio<sup>18</sup>. General Motors, por ejemplo, ha disminuido el uso de termoplásticos en las carrocerías cambiándolos por nanoarcillas<sup>19</sup>.

### Pinturas y recubrimientos no son la excepción

Dentro de la industria automotriz, una de las áreas en donde los nanomateriales son más utilizados es en el desarrollo de pinturas y recubrimientos.

El recubrimiento de las carrocerías con nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Zn y ZnO permite mejorar su protección y su resistencia al rayado, además de favorecer al aspecto y proporciona una mayor durabilidad<sup>20</sup>. La capa más externa de pintura protege al automóvil del entorno climático exterior ya que, debido a las condiciones meteorológicas extremas a las que los vehículos están expuestos, se pueden causar grietas y desgaste en las superficies de la carrocería<sup>21</sup>.

Un ejemplo son las nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , ZnO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  aplicadas en recubrimientos poliméricos, las cuales aumentan su dureza, rellenan los poros y suprimen el desarrollo de grietas, lo cual protege al automóvil del desgaste por rayado, agrietamiento y fricción<sup>22,23</sup>.

Una parte atractiva del uso de los nanomateriales en la pintura es “la posibilidad de variar el color en cuestión de minutos, con algo tan sencillo como apretar un botón”. Esto es posible gracias a la capacidad que tienen ciertos materiales (presentes en los recubrimientos) de cambiar la forma en la que se refleja la luz<sup>24</sup>.

También se están utilizando nanorevestimientos a base de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , que tienen propiedades autorreparadoras y que son capaces de mejorar las propiedades anticorrosivas del metal<sup>21</sup>. Marcas como Volkswagen recubren las superficies de sus automóviles con nanopelículas impermeables y antipolvo<sup>25</sup>. Mercedes Benz ha implementado una nanopintura que es 300 % más resistente a los rayones, agregando nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  y aglutinantes orgánicos que hacen que la pintura tradicional adquiera una estructura más densa<sup>26</sup>.

### ¿Qué hay de los interiores?

En los asientos, tableros, techos y vestiduras interiores se está incorporando tanto al grafeno (por su capacidad de autolimpieza) como a las nanofibras de carbono, que son conductoras térmicas y proporcionan interiores más cómodos<sup>18</sup>.

En los filtros de aire de los automóviles se usan nanopartículas de Au, Ag,  $\text{TiO}_2$ , ZnO, ya que su capacidad antimicrobiana permite reducir las posibilidades de colonización y posterior infección de los ocupantes<sup>27-29</sup>.

La aplicación de filtros recubiertos con nanofibras ha demostrado ser un método eficaz para garantizar una calidad adecuada de aire al interior del automóvil<sup>15</sup>. Además, los nanotubos de carbono, nanomateriales de plata y nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pueden

utilizarse como relleno en los tejidos de los automóviles; esto reduce las posibilidades de incendios en caso de accidentes<sup>21,30</sup>.

### ¡Hasta en los espejos y parabrisas!

La aplicación de nanopelículas antirreflejantes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y ZnO (de menos de 100 nm) sobre el parabrisas mejora la seguridad al filtrar los rayos UV, además de disminuir el deslumbramiento de las luces de los automóviles que circulan en sentido contrario. La superficie de los espejos retrovisores también están protegidos de la suciedad y el agua por estas mismas nanopelículas<sup>21,31</sup>.

Volkswagen y Toyota también recubren los parabrisas, ventanas y espejos de sus autos con nanocompuestos, esto con la finalidad de evitar que se ensucien, filtrar los rayos UV y de que se empañen con el frío, el calor o la lluvia<sup>11,25</sup>.

### Sin olvidar componentes electrónicos y eléctricos

La eficiencia energética, resistencia y productos más baratos son algunos de los avances en la iluminación de los automóviles.

Los “puntos cuánticos”, que son nanomateriales de entre 2 y 10 nm, tienen propiedades semiconductoras y pueden convertir un espectro de luz entrante en una frecuencia de salida de energía diferente, haciendo luces sintonizables que son aplicables en la iluminación interior y exterior de los automóviles, así como controlar los componentes electrónicos que gestionan los motores<sup>32</sup>.

Por otro lado, las nanopartículas de ZnO y las basadas en Ga son altamente semiconductoras, permitiendo que los fotones se puedan emitir desde ellos. Los LED (diodos emisores de luz) rojos, anaranjados y amari-

llos emiten fotones desde una capa emisora inorgánica a base de estas nanopartículas, lo que permite el desarrollo de pantallas y componentes eléctricos, además de ser parte fundamental en la elaboración de los dispositivos (chips) que controlan al auto<sup>32-34</sup>.

## En los automóviles eléctricos también participan

Se considera que el futuro –o quizá ya el presente de los automóviles– está en los vehículos eléctricos, los cuales son propulsados por uno o más motores eléctricos. Al tener instalados baterías, paneles solares o generadores eléctricos, estos proveen la energía suficiente para que el automóvil se pueda mover. Esto reduce significativamente la emisión de contaminantes en comparación con los vehículos a gasolina<sup>35</sup>.

Los nanotubos de carbono tienen propiedades eléctricas similares a las que tienen las terminales positivas y negativas de las baterías de iones de Li, además de que se necesita que estas sean ricas en carbono [Figura 3]. También se espera que los nanotubos de carbono se apliquen en módulos de potencia y celdas fotovoltaicas. Las pro-

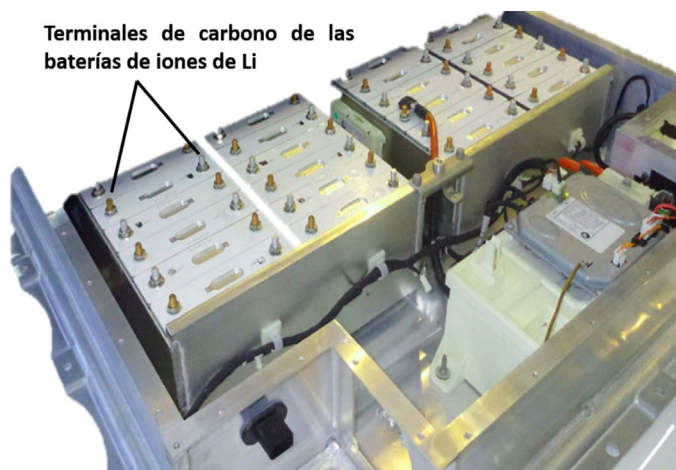


Figura 3. Acomodo de las baterías en el chasis de un automóvil eléctrico, se indican las terminales donde se conectan

piedades conductoras y de almacenaje de energía de los nanotubos de carbono son de interés en el sector de la energía solar debido a que la almacenan en su estructura reticular y la liberan al cambiar de forma (por un estímulo como la temperatura o un catalizador). Esto les permite recargarse en cuestión de segundos (por estas modificaciones en sus conformaciones), abriendo un campo importante en el desarrollo de las baterías<sup>36,37</sup>.

El grafeno, por otro lado, también puede utilizarse para fabricar baterías energéticamente más eficientes que las baterías de iones de litio<sup>38</sup>.

## ¿Cuál es el costo-beneficio?

Como se mencionó anteriormente, la adopción de los nanomateriales en la industria automotriz impacta en los costos de los automóviles.

Se requiere de una gran inversión para incorporar los nanomateriales en los procesos de fabricación de un automóvil, sin embargo, para su fabricación es posible obtener un beneficio importante de esta inversión, ya que los materiales son más económicos, tienen un mejor desempeño y ciclos de vida más largos. Estas características los hacen más rentables para su aplicación definitiva<sup>39</sup>.

## El futuro...

El control electrónico de los diferentes componentes del vehículo es uno de los aspectos cambiantes en los automóviles modernos. Los nanomateriales pueden utilizarse para desarrollar todos los subsistemas del automóvil, tales como elementos conductivos, neumáticos, revestimientos antirreflejantes para pantallas y retrovisores, polímeros y metales reforzados, ad-

hesivos, lubricantes y el mejoramiento de baterías, solo por mencionar algunos. Los automóviles también necesitan adecuar o mejorar los sensores de movimiento, radar y temperatura para detectar personas, animales y objetos en su trayecto, aumentando su seguridad y autonomía.

Otro factor por considerar es que los nanomateriales deben incluirse en un marco regulatorio más estricto. Aunque existen leyes que controlan su uso<sup>40</sup>, es importante seguir evaluando las consecuencias y límites de aplicabilidad (sobre todo para proteger a los usuarios del impacto a la salud que causa estar expuesto a ellos, así como los impactos al medio ambiente). Todo esto con la finalidad de satisfacer la creciente demanda que hay sobre vehículos modernos, seguros y duraderos [Figura 4].

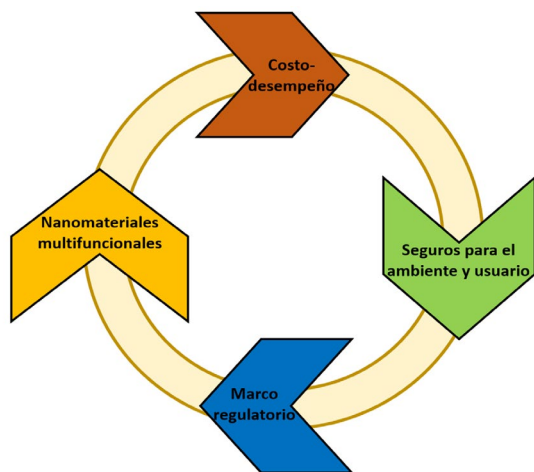


Figura 4. Factores a considerar para las aplicaciones de los nanomateriales en el campo automotriz

## Conclusión

En este artículo se mencionaron, de manera general, algunos usos que tienen los nanomateriales para mejorar las partes que conforman a los automóviles y la revolución que están generando en esta industria (en la que han encontrado un lugar importante). Sus aplicaciones en los automóviles, des-

de el motor, la carrocería, los neumáticos y los diferentes componentes exteriores e interiores, impactan directamente en su eficiencia, durabilidad y seguridad, pero también en el beneficio económico que trae su implementación (aunado al desarrollo de vehículos eléctricos y más modernos).

La utilización de los nanomateriales en la industria automotriz presenta aún muchos retos, desde su investigación hasta la implementación. Se tratan de nuevos materiales que todavía falta explorar a profundidad, pero que ya están abriendo el camino hacia una nueva era de automóviles.

## Referencias

1. M. Quintili. "Nanociencia y Nanotecnología... un mundo pequeño". Cuadernos Del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación (2019). <https://doi.org/10.18682/cdc.v42i42.1430>.
2. N. Baig, I. Kammakakam, W. Falath. "Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges". *Materials Advances*, 2(2021), 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/d0ma00807a>.
3. V. Dhinakaran, M.V. Shree. "The Role and Applications of Nanomaterials in the Automotive Industry". *Nanomaterials and Nanocomposites* (2021), 51–59. <https://doi.org/10.1201/9781003160946-5>.
4. M. Mansoor, M. Shahid. "Carbon nanotube-reinforced aluminum composite produced by induction melting". *Journal of Applied Research and Technology* 14(2016), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.05.002>.
5. L. Busse, K. Peter, C.W. Karl, H. Geisler, M. Klüppel. "Reducing friction with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>-nanoparticles in NBR". *Wear* 271(2011), 1066–1071. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.017>.
6. W. Li, S. Zheng, B. Cao, S. Ma. "Friction and wear properties of ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composite nanoparticles". *Journal of Nanoparticle Research* 13(2010), 2129–2137. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9970-x>.
7. M. Kole, T.K. Dey. "Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant". *Experimental Thermal and Fluid Science* 34(2010), 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.12.009>.
8. S.N.A. Yusof, N.A.C. Sidik, Y. Asako, W. Japar, A.A. Mohd, S.B. Mohamed, N.M. Muhammad. "A comprehensive review of the influences of nanoparticles as a fuel additive in an internal combustion engine (ICE)". *Nanotechnology Reviews* 9(2020), 1326–1349. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0104>.
9. M. Pisarek, P. Kędzierzawski, M. Andrzejczuk, M. Hołdyński, A. Mikołajczuk-Zychora, A. Borodziński, M.

- Janik-Czachor. "TiO<sub>2</sub> Nanotubes with Pt and Pd Nanoparticles as Catalysts for Electro-Oxidation of Formic Acid". *Materials* 13(2020), 195. <https://doi.org/10.3390/ma13051195>.
10. N. Stafford. "Catalytic converters go nano". *Chemistry World* (2007).
11. F. Uddin. "Effects of Clay in Nylon Fibe". *Journal of Physics: Conference Series*, 2160(2022), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2160/1/012002>
12. F. Valentini, A. Pegoretti. "End-of-life options of tyres. A review". *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 5(2022), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.08.006>.
13. D. Bakošová, A. Bakošová. "Testing of Rubber Composites Reinforced with Carbon Nanotubes". *Polymers* 14(2022), 3039. <https://doi.org/10.3390/polym14153039>.
14. A.N. Alkhazraji. "Enhancement of Mechanical Properties and Handling Characteristic of Tire Rubber Using Different Percentage of Nano Aluminum Oxide and Carbon Black". *International Journal of Nanoelectronics and Materials* 11(2018), 263–270.
15. S.R. Adarmanabadi, M. Jafari, S.M.H. Farrash, M. Heidari. "Effect of nano clay, nano-graphene oxide and carbon nanotubes on the mechanical and tribological properties of crosslinked epoxy nanocomposite". *PLOS ONE* 16(2021). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259401>.
16. S.W. Choi, H.S. Cho, C.S. Kang, S. Kumai. "Precipitation dependence of thermal properties for Al–Si–Mg–Cu–(Ti) alloy with various heat treatment". *Journal of Alloys and Compounds* 16(2015), 1091–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.201>.
17. P. Luque, D.A. Mántaras, A. Maradona, J. Rocés, L. Sánchez, L. Castejón, H. Malón. "Multi-Objective Evolutionary Design of an Electric Vehicle Chassis". *Sensors* 20(2020). <https://doi.org/10.3390/s20133633>.
18. S.K. Tiwari, S. Sahoo, N. Wang, A. Huczko. "Graphene research and their outputs: Status and prospect". *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* 5(2020),10–29. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2020.01.006>.
19. R. Goyal, M. Sharma, U. Kumar Amberiya. "Innovative Nano Composite Materials and Applications in Automobiles". *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(2014), 3001–3009. <https://doi.org/10.17577/IJERTV3IS10695>
20. M.N. de Queiroz, A.M. de Oliveira Lima, M.E.G. Winkler, V.H. Fragal, A.F. Rubira, T. Sequinel, L. da Silva Ribeiro, F. Nunes de Souza Neto, E. Rodrigues Camargo, M. Z. Ferreira Arlindo, C. Saraiva Ogradowski, L. Fernando Gorup. "Conductive nanopaints: A remarkable coating". *Nanotechnology in the Automotive Industry* (2022), 429–49. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90524-4.00020-7>.
21. M. Shafique, X. Luo. "Nanotechnology in Transportation Vehicles: An Overview of Its Applications, Environmental, Health and Safety Concerns". *Materials* 12(2019). <https://doi.org/10.3390/ma12152493>.
22. E. Azmy, M.R.Z. Al-kholy, A.M. Al-Thobity, M.M. Gad, M.A. Helal. "Comparative Effect of Incorporation of ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, and SiO<sub>2</sub> Nanoparticles on the Strength and Surface Properties of PMMA Denture Base Material: An In Vitro Study". *International Journal of Biomaterials* 2022(2022), 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/5856545>.
23. S.M. Simon, A. Chandran, G. George, M.S. Sajna, P. Valparambil, E. Kumi-Barmiah, G. Jose, P. R. Biju, C. Joseph, N. V. Unnikrishnan. "Development of Thick Superhydrophilic TiO<sub>2</sub>–ZrO<sub>2</sub> Transparent Coatings Realized through the Inclusion of Poly(methyl methacrylate) and Pluronic-F127". *ACS Omega* 3(2018), 14924–14932. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01940>.
24. Y. Dahman, N. Niznik, N. Sadyathan. "Electronic and Electro-Optic Nanotechnology". *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers* (2017) 191–206. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51256-5.00009-5>
25. H. Shaban. "Volkswagen used weather cannons at a plant in Mexico to protect cars from hail. Farmers say the devices caused a drought". *The Washington Post* (2018). <https://www.washingtonpost.com/technology/2018/08/24/volkswagen-used-weather-cannons-plant-mexico-protect-cars-hail-farmers-say-devices-caused-drought/>
26. A. Law. "Mercedes-Benz Nano-Paint". *Auto123.Com* (2003). <https://www.auto123.com/en/news/mercedes-benz-nano-paint/46895/>
27. O. Hossain, E. Rahman, H. Roy, M.D.S Azam, S. Ahmed. "Synthesis, characterization, and comparative assessment of antimicrobial properties and cytotoxicity of graphene-, silver-, and zinc-based nanomaterials". *Analytical Science Advances* 3(2021), 54–63. <https://doi.org/10.1002/ansa.202100041>.
28. M. Guerrero Correa, F.B. Martínez, C.P. Vidal, C. Streitt, J. Escrig, C.L. de Dicastillo. "Antimicrobial metal-based nanoparticles: a review on their synthesis, types and antimicrobial action". *Beilstein Journal of Nanotechnology* 11(2020), 1450–1469. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.129>.
29. D.S. de Almeida, L.D. Martins, M.L. Aguiar. "Air pollution control for indoor environments using nanofiber filters: A brief review and post-pandemic perspectives". *Chemical Engineering Journal Advances* 11(2022). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100330>.
30. C. Mullins-Jaime, T.D. Smith. "Nanotechnology in Residential Building Materials for Better Fire Protection and Life Safety Outcomes". *Fire* 5(2022). <https://doi.org/10.3390/fire5060174>.
31. J. Mathew, J. Joy, S.C. George. "Potential applications of nanotechnology in transportation: A review". *Journal of King Saud University - Science* 31(2019), 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.015>.
32. S.J. Pearton, F. Ren. "Advances in ZnO-based materials for light emitting diodes". *Current Opinion in Chemical Engineering* 3(2014), 51–55. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.11.002>.
33. E.F. Schubert, T. Gessmann. "Light Emitting Diodes". *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (2005), 102–111. <https://doi.org/10.1016/b0-12-369401-9/00498-8>.
34. C.J. Zollner, S.P. DenBaars, J.S. Speck, S. Nakamura. "Germicidal ultraviolet LEDs: a review of applications and semiconductor technologies". *Semiconductor Science and Technology* 36(2021). <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac27e7>.
35. W.J. Requia, M. Mohamed, C.D. Higgins, A. Arain, M. Ferguson. "How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health".

Atmospheric Environment 185(2018), 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.040>.

36. F. Cesano, M.J. Uddin, K. Lozano, M. Zanetti, D. Scarno. "All-Carbon Conductors for Electronic and Electrical Wiring Applications". *Frontiers in Materials* 7(2020). <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00219>.

37. R. Maheswaran, B.P. Shanmugavel. "A Critical Review of the Role of Carbon Nanotubes in the Progress of Next-Generation Electronic Applications". *Journal of Electronic Materials* 51(2022), 2786–2800. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09516-8>.

38. A. Ali, F. Liang, J. Zhu, P.K. Shen. "The role of graphene in rechargeable lithium batteries: Synthesis, functionalisation, and perspectives". *Nano Materials Science* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2022.07.004>.

39. N.U.M. Nizam, M.M. Hanafiah, K.S. Woon. "A Content Review of Life Cycle Assessment of Nanomaterials: Current Practices, Challenges, and Future Prospects". *Nanomaterials* 11(2021). <https://doi.org/10.3390/nano11123324>.

40. <https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/control-nanoscale-materials-under>.





# Silicio poroso en teranóstico humano

**Estíbaliz M. Ramírez y Chumin Wang**

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S. N. Ciudad Universitaria, CP 04510, CDMX, México  
[chumin@unam.mx](mailto:chumin@unam.mx)

## Resumen

El teranóstico (terapia y diagnóstico) es un nuevo concepto que busca integrar la detección, rectificación y liberación de medicamentos en un solo microdispositivo. Este artículo presenta los avances recientes del silicio poroso aplicados al área biomédica. Estas aplicaciones van desde sensores de fluidos biológicos, microsuministro de medicamentos, inmunoterapia de cáncer, hasta la regeneración de tejido cutáneo.

## Palabras clave:

Semiconductor poroso; Liberación farmacéutica; Oncoimmunoterapia; Regeneración cutánea; Biosensor.

## Introducción

El silicio es el semiconductor más utilizado en la actualidad, con llenado electrónico y energía de Fermi en una brecha energética de 1.1 eV se encuentra entre una banda electrónica llena y otra vacía a temperatura de 0 K. Las propiedades electrónicas de los semiconductores dependen sensiblemente de las impurezas, produciendo portadores mayoritarios tipo-n (carga negativa) o tipo-p (carga positiva). Es la combinación de estos

dos tipos de semiconductores lo que genera la microelectrónica actual, en donde el silicio ha sido protagonista gracias a su abundancia en la corteza terrestre (además, el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es uno de los mejores aislantes eléctricos).

Existe un creciente interés por el estudio de los materiales porosos debido a su facilidad de producción y extensas aplicaciones. Entre las aplicaciones basadas en silicio poroso (PSi) se encuentran los LED integrados en un chip [1], reflectores omnidireccionales [2] e interfaces entre sistemas biológicos y electrónicos [3]. Además, PSi cuenta con un área superficial de hasta  $1100 \text{ m}^2/\text{g}$  [4], elevada biocompatibilidad con el cuerpo humano (degradándose para formar ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) [5]) y afinidad con la microelectrónica actual.

El primer PSi fue descubierto en 1956 en los Laboratorios Bell, por Arthur e Ingeborg Uhler, cuando ellos intentaban buscar un aislante eléctrico basado en silicio para los circuitos integrados [6]. Sin embargo, dicha búsqueda se vio interrumpida cuando encontraron que el  $\text{SiO}_2$  era un mejor

aislante. En 1990, Leigh Canham encontró un PSi (con una fotoluminiscencia “en visible” y a temperatura ambiente) que es 104 veces más eficiente que el silicio cristalino [4]. Fue entonces que propuso el modelo del confinamiento cuántico para explicar el origen de sus propiedades electrónicas y ópticas [7]. La porosidad, morfología y diámetro de poro pueden controlarse durante la anodización a través de la composición del electrolito y densidad de corriente electroquímica. Además, la orientación cristalina, tipo de dopaje y su concentración (o resistividad eléctrica) en la oblea de silicio cristalino tienen también una participación decisiva en la topología de los poros. El PSi puede tener varias presentaciones: película delgada con y sin sustrato, así como micro o nano partículas o discos.

Otra característica del PSi es su extensa área superficial, la cual puede funcionalizarse para la adsorción molecular con especificidad, sensibilidad y reversibilidad bajo diseño para sensores de gas y de fluidos biológicos, así como aplicaciones *in vivo*, tales como acarreador de medicamentos y monitoreo de tratamiento [4]. Dichas características y aplicaciones se revisarán a lo largo del presente artículo.

### Silicio poroso en aplicaciones biomédicas

La medicina actual puede dividirse en las fases de diagnóstico y tratamiento, es decir, se inicia con el análisis clínico que produce los resultados que serán interpretados por un especialista y posterior a ello se tomarán decisiones del tratamiento. La tecnología digital pretende integrar el teranóstico en un solo microdispositivo que sea capaz de tomar decisiones y aprender a corregir las dosis de tratamiento durante el procedimiento

(*machine learning*) para tener una terapia personalizada y precisa. La nanomedicina se encarga de monitorear, reparar, construir y controlar los sistemas biológicos humanos a nivel molecular. A continuación, se describen los adelantos en transportadores farmacéuticos, terapia oncológica, regeneración cutánea y biosensores basados en PSi.

### •Microsuministro de medicamentos

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), los materiales porosos pueden dividirse en tres categorías dependiendo su diámetro de poro. Los microporos son menores a 2 nm, los mesoporos se encuentran entre 2 y 50 nm, mientras que los macroporos son mayores a 50 nm. La enorme área superficial y biocompatibilidad del PSi permite funcionalizarse a base de biopolímeros, tales como ácidos nucleicos, péptidos, proteínas y polisacáridos, para la adsorción, transportación y liberación de medicamentos. Las nano o micropartículas acarreadoras se fabrican mediante la fragmentación ultrasónica a partir de películas de PSi con variación en su geometría, tamaño y funcionalización para abarcar una amplia gama de medicamentos en un microdispositivo con una liberación prolongada y controlada, considerando desde diseño inicial la protección de degradación enzimática y la posibilidad de traspasar las barreras derivadas de su vía de administración. Se han utilizado PSi y SiO<sub>2</sub> poroso (preparado a partir de PSi por oxidación [8]) como base de matrices huésped para la liberación de la dexametasona, ibuprofeno, cisplatino, entre otros medicamentos [9]. En 2002 se efectuó el primer estudio de transporte *in vitro* de insulina porcina con isotiocianato de fluoresceína (FITC) en micropartículas de PSi atravesando una monocapa de células

Caco-2 (células inmortalizadas de adenocarcinoma colorrectal humano), la cual imita la capa epitelial intestinal. La administración oral de insulina representa una alternativa menos invasiva para los pacientes diabéticos, pero debe superar dos retos importantes que son: la degradación enzimática en el tracto digestivo y la baja permeabilidad a través de la barrera epitelial en el intestino. En este estudio, la FITC-insulina y laurato sódico ( $C_{12}$ ) fueron inyectados mediante el efecto capilar en las micropartículas de PSi usando una micropipeta, donde FITC es una proteína farmacológicamente activa lipofílica y  $C_{12}$  es un potenciador de permeación. Los resultados mostraron que era 10 veces más eficiente el flujo mediante partículas de PSi como vehículo de administración comparado con soluciones líquidas tradicionales y hasta 100 veces mejor en comparación con formulaciones sin el potenciador  $C_{12}$  [10]. Recientemente, los estudios *in vivo* en ratas diabéticas mostraron un incremento de 100 % de la biodisponibilidad oral cuando la insulina es encapsulada por nanopartículas de PSi funcionalizadas con biopolímeros, produciendo una reducción de glucosa en sangre en un 20 % [11].

Otro uso biomédico de PSi se encuentra en la terapia con células madre para el infarto de miocardio, donde las nanopartículas de PSi funcionalizadas con un péptido llamado transactivador de transcripción viral de inmunodeficiencia humana tipo 1 (HIV-1 TAT) fueron llenadas por la proteína Wnt3a encargada de la proliferación celular. Dichas nanopartículas fueron ligadas a las células madre mesenquimales (MSC) durante una incubación de ambos por 4 horas, lo cual conduce a un trasplante de células madre en ratas Sprague-Dawley controlado y monitoreado por el microscopio de ultrasonido

en tiempo real a lo largo de una liberación sostenida de Wnt3a por las nanopartículas de PSi. Después de 30 días del trasplante, los exámenes histológicos de corazón, hígado, bazo, pulmón y riñón se muestran sin daños notables [12]. Estos estudios confirman el gran potencial de PSi en suministro farmacológico sostenido.

### •Inmunoterapia oncológica

Las investigaciones recientes han mostrado que se pueden reducir notablemente los efectos secundarios de quimioterapia mediante la inmunoterapia para cáncer. Ahí, el PSi está teniendo un papel importante gracias a su capacidad de carga y versatilidad de funcionalización. Uno de los retos actuales es superar las barreras biológicas que nos separan de alcanzar los sitios patológicos. Al respecto, la geometría discoidal de micropartículas de PSi ha permitido alcanzar a los tumores a partir de una administración intravenosa. La liberación de medicamentos a velocidad controlada constituye otro reto importante en el diseño de micropartículas de PSi, dado que una administración oral vía tracto gastrointestinal requiere adicionalmente una capa polimérica pH-sensible, protegiendo péptidos y proteínas para liberarse en el intestino delgado [13].

Los canales mesoporosos pueden controlar la velocidad de liberación, permitiendo que estímulos externo-ambientales modifiquen la demanda del medicamento. Por ejemplo, el implante percutáneo de partículas de PSi alrededor de 20  $\mu\text{m}$  que contiene un isótopo radiactivo de  $^{32}\text{P}$ , el cual provee radiación local al tumor. Dicho isótopo se sintetiza en PSi a través de la transmutación de Si alterando su núcleo atómico mediante una emisión beta menos inducida por la exposición de neutrones

de alta energía procedentes de un reactor nuclear. Al término de la entrega de la dosis radiactiva, el dispositivo se desintegra a través del ácido silícico hidrolizado, por lo que no requiere ningún procedimiento para removerlo [9]. Por otro lado, los fragmentos de PSi cargados con doxorubicina muestran una liberación continua más allá de 5 horas, retardando la proliferación de líneas celulares cancerígenas LoVo y HT-29 en el colon [14]. En general, las inmunoterapias de cáncer han sido exitosamente incorporadas en dispositivos basados en PSi con algún agente anticancerígeno.

### •Regeneración de tejidos

La terapia regenerativa es otra de las principales aplicaciones de la micro administración farmacéutica basadas en PSi, iniciando con la desinfección de heridas. Por ejemplo, el PSi con  $\text{Cu}^{2+}$  funcionalizado con polidopamina presenta efecto fototérmico, útil en la terapia antibacteriana y la desinfección de heridas. La liberación de  $\text{Cu}^{2+}$  antibacteriano es sensible a estímulos, tales como cambio en el pH e irradiación con láser de infrarrojo cercano, y tiene un amplio efecto sinérgico antibacteriano del estafilococo dorado y *Escherichia coli* [15]. Asimismo, la regeneración de heridas causadas por diabetes mediante micropartículas de PSi decoradas con puntos cuánticos de grafeno y rellenas de péptidos envueltos con películas de quitosano puede monitorearse a través del cambio de fluorescencia, de rojo a azul, el cual indica el grado de curación de la herida diabética. Al compararlo con un recubrimiento transparente de quitosano, las micropartículas tuvieron una liberación de medicamento sensible a estímulos al encontrarse en ambientes ligeramente ácidos y altamente oxidativos en las heridas diabéticas. Los resultados in vitro e in vivo demostraron que mejoró la proliferación

y migración de las células, y también se aumentó la curación de las heridas diabéticas. La tasa de decoloración fluorescente indica en tiempo real la exacerbación o cicatrización de las heridas diabéticas [16]. Los tratamientos basados en PSi parecen ser una buena alternativa a los convencionales, mostrando una buena adaptación al microambiente de la herida, así como una retroalimentación que puede acortar el tiempo de procedimiento, ahorrar costo sanitario y reducir el dolor en el paciente.

### •Biosensores

Un típico biosensor parte de un biorreceptor, el cual usa biomoléculas para interactuar con el analito de interés mediante interacciones anticuerpo/antígeno, enzimas/ligandos, ácidos nucleicos/ADN, receptores celulares/células, entre otras. Los biosensores modernos pueden contener un transductor y un sistema electrónico de procesamiento para cuantificar la medición, donde PSi ha sido utilizado. Un ejemplo reciente es el desarrollo de un biosensor de dopamina basado en PSi decorado con oro y poli-3-hexiltiofeno ( $\text{Au@PSi-P3HT}$ ), obtenido mediante fotodeposición. La dopamina es un neurotransmisor catecolaminérgico presente en el sistema nervioso central e interviene en la conducta motora, emociones y procesos neuroendocrinos. El biosensor electroquímico  $\text{Au@PSi-P3HT}$  es no enzimático y tiene una sensibilidad de  $0.5112 \mu\text{A}/\mu\text{M}\cdot\text{cm}^2$ , un rango dinámico lineal de 1 a  $460 \mu\text{M}$  y un límite de detección de  $0.63 \mu\text{M}$ , así como una muy buena estabilidad, reproducibilidad y selectividad [17].

Por otra parte, los biosensores ópticos basados en PSi han registrado un buen crecimiento en las últimas décadas, debido a su extrema sensibilidad, selectividad, reversi-

bilidad y rapidez. Los mecanismos de detección empleados por dichos biosensores son principalmente a través de resonadores, interferómetros, fluorescencia y resonancia de plasmón de superficie. Un ejemplo de biosensor óptico para la detección de ácido desoxirribonucleico (ADN) en tiempo real basado en espejos de Bragg de PSi se desarrolló recientemente utilizando la fluorescencia derivada de los puntos cuánticos CdSe/ZnS para etiquetar el ADN, los cuales fueron excitados con un láser de 488 nm y la longitud de onda de fluorescencia fue de 625 nm, logrando un límite de detección de 0.42 pM [18].

En resumen, los biosensores basados en PSi representan un campo de investigación activo y en crecimiento, a pesar de que todavía se encuentra en su fase inicial atravesando la pandemia mundial de COVID-19, como se muestra en la figura, cuyos datos fueron obtenidos en la página de Scopus empleando las palabras clave de "Porous silicon" y "Biosensor" el día 12 de mayo del 2023.

## Perspectivas

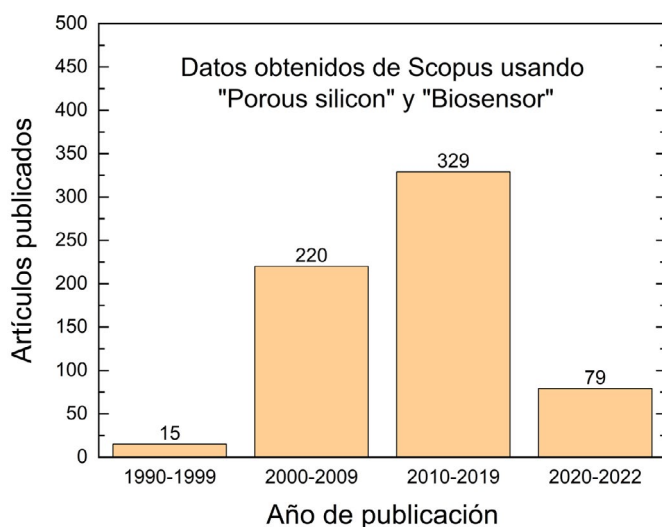
La administración inteligente y selectiva de medicamentos ha sido el sueño de mu-

chas generaciones de científicos y el PSi ha brindado la posibilidad para lograr ese sueño, combinando la detección continua y la administración farmacológica de forma autónoma en las células patógenas sin dañar el tejido sano circundante. Los experimentos con micro y nano partículas de PSi han demostrado que este sueño puede ser realidad en un futuro cercano. Sin embargo, existen retos importantes en el entendimiento de la interacción entre PSi y cada patología específica, así como los efectos de su geometría, funcionalización y microencapsulación.

Respecto a la medicina del futuro, el campo de la inmunoterapia de cáncer y la micro administración de medicamentos encapsulados en nanopartículas está en continua evolución, mostrando prometedoras aplicaciones biomédicas a través de dispositivos inteligentes capaces de detectar el medio que los rodea y programar in-vivo una administración médica personalizada para cada paciente. En este contexto la ciencia e ingeniería de materiales ofrece nuevas alternativas en los diagnósticos y tratamientos, así como en la prevención de enfermedades. El teranóstico basado en semiconductores porosos y técnicas como regeneración vía células madre, reparación molecular, así como el cultivo y trasplante de órganos podría conducirnos a una significativamente mejor y más larga vida.

## Agradecimiento

El presente trabajo fue apoyado por los proyectos PAPIIT-IN110823 y CF-2023-I-830. E.M.R. agradece la beca de doctorado otorgada por el CONAHCYT.



## Referencias

- [1] K. D. Hirschman, L. Tsybeskov, S. P. Duttagupta y P. M. Fauchet, Silicon-based visible light-emitting devices integrated into microelectronic circuits, *Nature* 384, 338-341 (1996).
- [2] A. Palavicini y C. Wang, Ab-initio determination of porous silicon refractive index confirmed by infrared transmittance measurements of an omnidirectional multilayer reflector, *Appl. Phys. B* 124, 65 (8pp) (2018).
- [3] S. Ben-Tabou de Leon, A. Sa'ar, R. Oren, M. E. Spira y S. Yitzchaik, Neurons culturing and biophotonic sensing using porous silicon, *Appl. Phys. Lett.* 84 (22), 4361-4363 (2004).
- [4] L. T. Canham (Ed.), *Handbook of Porous Silicon*, 2nd edition (Springer, 2018) pp. 215, 286, 287 y 1089.
- [5] L. T. Canham, Bioactive silicon structure fabrication through nanoetching techniques, *Adv. Mater.* 7 (12), 1033-1037 (1995).
- [6] M. J. Sailor, *Porous Silicon in Practice: Preparation, Characterization and Applications* (Wiley-VCH, 2011) p. 1; A. Uhlir Jr. y I. Uhlir, Historical perspective on the discovery of porous silicon, *Phys. Stat. Sol. C* 2 (9), 3185-3187 (2005).
- [7] L. T. Canham, Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers, *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046-1048 (1990).
- [8] R. Cisneros, H. Pfeiffer y C. Wang, Oxygen absorption in free-standing porous silicon: A structural, optical and kinetic analysis, *Nanoscale Res. Lett.* 5, 686-691 (2010).
- [9] E. J. Anglina, L. Cheng, W. R. Freemanb y M. J. Sailor, Porous silicon in drug delivery devices and materials, *Adv. Drug Deliv. Rev.* 60 (11), 1266-1277 (2008).
- [10] A. B. Foraker, R. J. Walczak, M. H. Cohen, T. A. Boiarski, C. F. Grove y P. W. Swaan, Microfabricated porous silicon particles enhance paracellular delivery of insulin across intestinal Caco-2 cell monolayers, *Pharm. Res.* 20, 110-116 (2003).
- [11] R. Rao, X. Liu, Y. Li, X. Tan, H. Zhou, X. Bai, X. Yang y W. Liu, Bioinspired zwitterionic polyphosphoester modified porous silicon nanoparticles for efficient oral insulin delivery, *Biomater. Sci.* 9, 685-699 (2021).
- [12] S. Qi, P. Zhang, M. Ma, M. Yao, J. Wu, E. Mäkilä, J. Salonen, H. Ruskoaho, Y. Xu, H. A. Santos y H. Zhang, Cellular internalization-induced aggregation of porous silicon nanoparticles for ultrasound imaging and protein-mediated protection of stem cells, *Small* 15, 1804332 (13pp) (2019).
- [13] W. Li, Z. Liu, F. Fontana, Y. Ding, D. Liu, J. T. Hirvonen y H. A. Santos, Tailoring porous silicon for biomedical applications: from drug delivery to cancer immunotherapy, *Adv. Mater.* 30, 1703740 (38pp) (2018).
- [14] L. Vaccari, D. Canton, N. Zaffaroni, R. Villa, M. Tormen y E. di Fabrizio, Porous silicon as drug carrier for controlled delivery of doxorubicin anticancer agent, *Microelectron. Eng.* 83, 1598-1601 (2006).
- [15] W. Duan, X. Liu, J. Zhao, Y. Zheng y J. Wu, Porous silicon carrier endowed with photothermal and therapeutic effects for synergistic wound disinfection, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14, 48368-48383 (2022).
- [16] Y. Cui, W. Duan, Y. Jin, F. Wo, F. Xi y J. Wu, Graphene quantum dot-decorated luminescent porous silicon dressing for theranostics of diabetic wounds, *Acta Biomaterialia* 131, 544-554 (2021).
- [17] J. Ahmed, M. Faisal, S.A. Alsareii, M. Jalalah y F. A. Harraz, A novel gold-decorated porous silicon-poly (3-hexylthiophene) ternary nanocomposite as a highly sensitive and selective non-enzymatic dopamine electrochemical sensor, *J. Alloys Compounds* 931, 167403 (12pp) (2023).
- [18] S. Zhang, M. Sun, X. Wang, J. Wang, Z. Jia, X. Lv y X. Huang, Spectral-free double light detection of DNA based on a porous silicon Bragg mirror, *Sensors* 22, 7048 (14pp) (2022).



# ¡Hablemos de Medicina Aeroespacial!, con el médico Ricardo Martínez Tapia

Astron Martínez

Asociación civil DiVU: Diversidad, cultura, género, alimentación y ciencia [www.divu.mx](http://www.divu.mx)  
[astronr@hotmail.com](mailto:astronr@hotmail.com)

*¿Te gustan las series y películas del espacio exterior?, ¿soñaste alguna vez con viajar en un transbordador espacial?*

Conciliar intereses personales y académicos podría no ser tan descabellado como tú crees. Así lo descubrió hace algunos años el joven Ricardo, quien siendo estudiante de la Prepa 5 averiguó la forma de realizar su servicio social preuniversitario en un instituto de CU (después de asistir a la conferencia de un investigador del Instituto de Astronomía de la UNAM, invitado por su escuela). Todo esto lo hizo sin interrumpir su vocación como médico. Fue durante el evento de divulgación científica más concurrido de nuestro país (Noche de las Estrellas) en su emisión de 2013, que Ricardo participó en la carpa temática Pequeños cosmonautas, y ya estudiando la carrera de médico cirujano, alrededor del 2015, vio un cartel pegado en su facultad que anunciaba el Primer Congreso Mexicano de Medicina Espacial, organizado para reconocer a nada menos que el pionero de la medicina aeroespacial en el país. Para ese entonces, Ricardo ya había tenido bastantes acercamientos con



la astronomía y la exploración espacial. Mucho antes de la popularización de las redes sociales, su pasión por el espacio lo llevó a escribirle un correo electrónico al primer astronauta mexicano, Rodolfo Neri Vela, ¡y este ocupado ingeniero y celebridad nacional le contestó de regreso!

Muchas son las anécdotas posibles y también las pulsiones que nos han llevado a los mesoamericanos a mirar las estrellas e imaginar viajes espaciales. Y es que en el espacio exterior todo cambia. Después de varios días flotando en una nave espacial, los músculos antigravitatorios que tenemos en



el cuerpo empiezan a atrofiarse, sumado a la expansión de los discos intervertebrales (y, en consecuencia, hay un aumento de unos 6 centímetros de estatura). Dormir, ir al baño, menstruar, admirar el paisaje celestial, ¡todo es diferente! La ciencia que se hace para el espacio también es diferente (y muy útil aquí en la Tierra). Recubrimientos de politetrafluoroetileno expandido que se inventaron para traer muestras de suelo durante las exploraciones a Marte son ahora utilizados para fabricar suturas empleadas en operaciones cardiacas. Las condiciones de microgravedad (en los laboratorios científicos ubicados fuera de este mundo, de la forma más literal posible) nos han ayudado a entender el plegamiento de proteínas involucradas en el Alzheimer o a proponer terapias para combatir el cáncer. También se han cristalizado proteínas, estudiado células T del sistema inmune y analizado el deterioro aeroespacial de la función inmunológica. Métodos rápidos y de bajo costo para monitorear la inflamación de los pulmones y el progreso del asma (que son actualmente utilizados en clínicas de todo el mundo) surgieron inicialmente como una investigación que buscaba proteger las vías

aéreas de los tripulantes espaciales, al igual que tanta tecnología de telemetría. Podría continuar con esta gran lista de aportaciones de la medicina aeroespacial, pero me gustaría tomar un momento para hablar de aquellas condiciones que, en palabras de nuestro entrevistado, “no sabemos por qué pasan”: las personas astronautas tienen una considerable pérdida de la agudeza visual (que es más común en hombres que en mujeres tripulantes) y no se sabe exactamente por qué ocurre este fenómeno denominado síndrome neuroocular asociado al vuelo espacial (“ceguera espacial”). Ciertos casos de trombosis han sido reportados, y el cambio en la palatabilidad de los alimentos ha sido propuesto como una posible explicación de por qué los astronautas comen mucho menos comida durante las misiones espaciales, en comparación con su dieta terrestre habitual.

Nuestro país no se ha quedado atrás en esta naciente ciencia. Por ejemplo, el doctor Ramiro Iglesias Leal, pionero de la medicina espacial en México, fue el responsable de interpretar el primer electrocardiograma proveniente del espacio exterior, durante la misión del Apolo 8, en 1968. La NASA lo invitó a ser el responsable de cardiología y también llegó a ser vicepresidente de la Asociación de





Medicina Aeroespacial de Estados Unidos, a finales de los años 80. Fue en honor a él que la Agencia Espacial Mexicana organizó el Primer Congreso Mexicano de Medicina Espacial en 2015, al que asistió nuestro entrevistado Ricardo Martínez Tapia, siendo aún estudiante de medicina y haciendo uso de todos los ahorros que pudo juntar para ir a San Luis Potosí, donde se llevó a cabo. Aunque Ricardo ya había conocido a Ramiro Iglesias en 2009, en un evento de divulgación científica del Taller Universitario de Investigación y Desarrollo Espacial, fue durante la organización de este congreso que supo por seguro que su futuro profesional y académico sería en esta muy nueva área de la medicina, a como diera lugar y con una oferta académica prácticamente

inexistente en ese tiempo. En 2019, Ricardo convenció a sus jefes del departamento de Fisiología de la Facultad de Medicina para ir a una capacitación en el prestigioso Civil Aerospace Medical Institute de Oklahoma y a su regreso comenzó con la planeación de una materia optativa de reciente creación que ahora lleva el nombre de Medicina y fisiología aeroespacial, junto con el médico Alejandro Hernández. Ricardo es actualmente uno de los coordinadores del departamento de Fisiología, donde siempre ha tenido cuórum en la materia optativa que él implementó, además de sumar ya cinco años dando clases de fisiología general en su alma mater y un taller de fisiopatología y neuroprotección en la vecina Facultad de Ciencias. Terminó su doctorado en ciencias biomédicas en la UNAM y en 2018 fundó la Sociedad Universitaria de Medicina Aeroespacial (SUMAe), que es única en el país y donde funge como presidente. También es miembro de la Aerospace Medical Association y la Society for Neuroscience.

La medicina espacial incluye investigación en ciencia básica, atención clínica y apoyo operativo. En sus hombros también recae una gran responsabilidad, porque cuando toca el tiempo de ponerla a prueba, durante los viajes espaciales, “es una de las cosas más delicadas, pues cualquier cosa puede salir mal... y los errores a esta escala atentan directamente contra la vida de los astronautas, además de costarnos miles de millones de dólares”. Son muchísimas las aplicaciones y usos tecnológicos que le damos aquí en la Tierra al conocimiento generado por las ciencias espaciales (de las que ya he mencionado algunos ejemplos), y todavía debemos sumarle el desarrollo formal de la medicina aeronáutica, que es aquella que estudia la salud de las personas tripulantes





y usuarias de aviones, helicópteros y demás aeronaves de uso militar y comercial. Algunos temas selectos y módulos de medicina aeronáutica se estudian, por lo tanto, dentro de la especialidad de medicina del trabajo. Para entenderlo debemos recordar que la frontera entre el espacio exterior y la atmósfera terrestre surgió, más que nada, como un acuerdo legal por motivos políticos. Es de esta forma que el estudio de la medicina aeronáutica puede verse como una extensión de la medicina espacial (y, en conjunto, se le llama medicina aeroespacial). En su práctica docente, Ricardo Martínez Tapia utiliza textos de algunos de sus divulgadores científicos favoritos, como Carl Sagan e Isaac Asimov (puedes leer una reseña de Asimov en el número 30 de esta revista). Entre sus videojuegos favoritos están Halo y StarCraft, y le gusta la música de Queen (recordemos que el guitarrista Sir Brian May formó parte del equipo de la NASA New Horizons para enviar una misión al planeta enano Plutón) y de Muse, cuyo álbum titulado La segunda ley (de la termodinámica) tiene un conectoma coloreado obtenido mediante resonancia magnética funcional a manera

de portada. Con esto último, Ricardo recuerda los laboratorios de neurohistología, las tinciones argénticas de tejidos y sus estudios de posgrado en neuroendocrinología y traumatismo craneoencefálico. Pero de algo tan complejo como las ciencias espaciales también pueden hacerse ilustrativos talleres de divulgación para infancias. En una de tantas participaciones de la sociedad que Ricardo dirige recuerda aquella dinámica que simula un viaje espacial y les explica a los usuarios del taller sobre la atrofia de los músculos antigravitatorios en astronautas (de la que hablé al principio), el resultado es un considerable “aumento en la estatura” de los participantes durante el juego.

*¿Qué habría sido de esta joven promesa si no hubieran existido los programas federales de fomento a la investigación en ciencia básica, acercamiento preuniversitario a las ciencias y financiamientos a la comunicación y divulgación en todos los niveles educativos?*

Muy seguramente quedaría como la pueril inquietud de un joven más que gustaba de coleccionar calcomanías con fotos de orbitadores espaciales y del Hubble en un álbum de estampas. En cambio, Ricardo Jesús Martínez Tapia, de 31 años de edad, ha logrado profesionalizar la medicina aeroespacial, presentar opciones de crecimiento académico para sus estudiantes (galenos en formación) y para las juventudes interesadas, al tiempo que comparte su pasión por el espacio en charlas de divulgación, congresos internacionales, talleres infantiles y con una OSC conformada por profesionistas y por todo aquel público que se acerque a conocer más de la Sociedad Universitaria de Medicina Aeroespacial.



# Novedosas alternativas para el diseño de biomateriales a partir de almidones modificados dualmente

Lucila Concepción Núñez-Bretón<sup>1</sup>, Luis Medina-Torres<sup>2</sup>, Diola Marina Núñez-Ramírez<sup>3</sup>, Barbara Cooper-Bribiesca<sup>4</sup>, Mónica Reyes-Reyes<sup>5</sup>, José Esteban López-Aguilar<sup>7</sup>, Francisco Erik González-Jiménez<sup>6</sup>, O. Manero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. Departamento de Reología y Mecánica de Materiales, Circuito Exterior S/N, Circuito de la Investigación Científica, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México

<sup>2</sup> Facultad de Química, UNAM. Circuito Exterior S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510, Ciudad de México, México

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Químicas, UJED. Av. Veterinaria S/N, Circuito Universitario, Valle del sur, 34120, Durango, México

<sup>4</sup> Escuela Nacional Preparatoria Plantel 2, UNAM. Circuito Interior Avenida Río Churubusco 1418, Carlos Zapata Vela, Iztacalco, 08040, Ciudad de México, CDMX

<sup>5</sup> Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN. Wilfrido Massieu S/N, U.P. Adolfo López Mateos, 07738, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, CDMX

<sup>6</sup> Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Oriente 6 1009, Rafael Alvarado, 94340 Orizaba, Veracruz, México

<sup>7</sup> Facultad de Química, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México  
[lucilanunez-breton@materiales.unam.mx](mailto:lucilanunez-breton@materiales.unam.mx)

## Resumen

Los biomateriales actuales deben ser multifuncionales, dinámicos y biocompatibles. También deben ser capaces de proporcionar una plataforma para las interacciones biológicas y químicas. Al emplear diversas biomoléculas que formen parte de la composición del biomaterial, tanto la superficie como la estructura pueden alterarse para facilitar la adaptación del mismo al entorno fisiológico de los seres vivos y al mismo tiempo realizar las funciones requeridas. En

recientes investigaciones se ha reportado que el almidón (un polisacárido) presenta potenciales propiedades para ser utilizado como biomaterial, entre otras cosas por su origen natural, ser de fácil obtención y también económico. Es la reserva de energía de muchas fuentes vegetales, también es comestible, no tóxico, biodegradable, biocompatible y puede modificarse fácilmente. No obstante, sus aplicaciones industriales se han visto limitadas por ciertas propiedades intrínsecas del almidón, como su rápida

retrogradación, insolubilidad en agua fría, hidrofiliidad, sinéresis (pérdida de agua), altas temperaturas de gelatinización, poca resistencia a la fuerza de cizalla o bajas propiedades mecánicas y de barrera. Esto nos ha llevado a modificar al almidón y obtener así diferentes propiedades físicas, químicas, funcionales y mecánicas que permiten ampliar el espectro de uso. Actualmente, diversos grupos de investigación se han enfocado en obtener almidones con más de una modificación, es decir, almidones modificados dualmente, ya sea por métodos físicos, químicos y/o enzimáticos, o la mezcla entre estos. El principal objetivo es incrementar su funcionalidad, resolver problemas de solubilidad, estabilidad, mejorar propiedades mecánicas al flujo, anfifílicas, de digestibilidad, de barrera funcional, entre otras. Bajo este contexto, es relevante conocer las características de este tipo de biopolímero, sus variedades, en qué consisten las modificaciones que se realizan, cuándo se habla de modificaciones duales y cómo se emplean para el diseño de biomateriales. Este artículo puede servir como una breve introducción al tema, pues debemos recordar que se siguen explorando nuevas alternativas que sean viables y efectivas para beneficiar al ser humano y a los seres vivos, con el desarrollo de biomateriales que cubran algunas de las necesidades específicas.

### Palabras claves

Almidón, modificación dual, biopolímeros.

### ¿Qué es el almidón y por qué es un biopolímero?

Los biopolímeros son macromoléculas formadas por numerosas unidades repetitivas denominadas monómeros, estos están constituidos por sustancias orgánicas derivadas de fuentes naturales, como plantas,

animales y microorganismos. Algunos de estos se caracterizan por ser no tóxicos, biodegradables y biocompatibles, y el almidón cumple con todas estas propiedades. De acuerdo a su origen (o procedencia de extracción de fuentes naturales), al almidón se le denomina biopolímero. La principal función del almidón en plantas es servir como fuente de reserva de energía. Es por esto que ocupa el segundo lugar de abundancia en la naturaleza, estando en primer lugar la celulosa. Este se almacena (después de la fotosíntesis) en los amiloplastos, dentro de la célula vegetal, y mayoritariamente se encuentran en tejidos de almacenamiento, como los meristemos, cotiledones, en el endospermo de las semillas, tubérculos y frutas inmaduras. El almidón tiene diferentes mecanismos de biosíntesis para el desarrollo de la planta y para su acumulación, esto depende de su origen botánico, condiciones genéticas, agronómicas y ambientales [1].

### ¿Un biopolímero puede ser utilizado para diseñar biomateriales?

Un biomaterial es cualquier sustancia o conjunto de sustancias diseñadas para interactuar con sistemas biológicos con el propósito de beneficiar al ser humano u otros organismos, teniendo una respuesta biológica aceptable a lo que se le conoce como biocompatibilidad, además de ser biodegradable, lo que lo hace amigable con el ambiente y esto cambia dependiendo del área de aplicación. Los biomateriales pueden tener una variedad de propiedades únicas o múltiples, como es la bioactividad, biodegradabilidad, biocompatibilidad y no toxicidad. Sin embargo, actualmente no hay ninguna composición uniforme de un biomaterial que cumpla con todos los requerimientos necesarios para una función requerida. Por tal motivo, es de gran inte-

res emplear biopolímeros con propiedades específicas que puedan ser susceptibles a modificación o funcionalización, de tal forma que sean parte de un sistema complejo, capaz de interactuar con componentes de sistemas vivos. En relación con lo anterior, el almidón ha presentado propiedades para interactuar con muchos compuestos, manteniendo su capacidad de formar biomateriales [2].

### ¿Por qué es importante la composición química del almidón?

Este biopolímero está formado por moléculas orgánicas: unidades de glucosa (anhidroglucosa) conectadas entre sí mediante enlaces glucosídicos. Al estar formado únicamente por estas moléculas recibe el nombre de homopolisacárido, de fórmula general  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , y está compuesto por alrededor de 1000 hasta 2000 000 unidades de glucosa. Estas se unen mediante enlaces  $\alpha$ -(1-4), que dan origen a la cadena lineal amilosa (20 a 30 %), y  $\alpha$ -(1-6), correspondiente a la cadena ramificada amilopectina (70 a 80 %), estos enlaces se presentan aproximadamente cada 22 unidades (esto ocasiona que sea una estructura compleja y semicristalina). Dependiendo de la fuente botánica y del mecanismo de biosíntesis se define la composición física, química y morfológica, así como la estructura molecular de la amilosa y la amilopectina de cada fuente de extracción de almidón. La importancia de su composición química radica en que las moléculas de glucosa presentan tres grupos hidroxilo reactivos, que en la mayoría de los casos tiene un grupo hidroxilo primario y dos secundarios, esto hace que las glucosas presentes en el almidón puedan ser susceptibles a reacción bajo ciertos entornos químicos (que lo hace apto a sufrir modificaciones a nivel estructural [3] (Figura 1)).

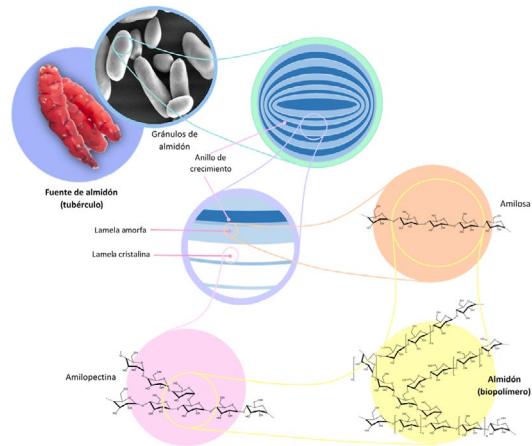


Figura 1. Estructura química del almidón (biopolímero) [modificado de Adewale *et al.*, 2022]

### Fuentes de Almidón

Millones de toneladas de almidón se extraen anualmente de diversas fuentes convencionales como el maíz (64 %), trigo (6 %), papa (6 %), mandioca y otras fuentes (como el arroz). También se ha ampliado la extracción de este biopolímero a partir de otras fuentes no convencionales, debido a su alta demanda alimentaria o para otras aplicaciones comerciales como los biocombustibles. Estas fuentes prometen ser una alternativa para disminuir costos y mejorar las propiedades de las fuentes convencionales. Dentro de las fuentes no convencionales de almidón se encuentran algunos tubérculos, frutas (mango verde, plátano verde, manzanas, jaca y sus semillas), rizomas (jengibre, cúrcuma, flor de loto), cereales (amaranto, mijo), pseudocereales (trigo sarraceno), legumbres (frijol lima, frijol blanco, lenteja), frutos secos (castaño de indias, castaño de agua), además de los desechos agroindustriales [4].

### Principales aplicaciones a nivel mundial

Se proyecta que para el año 2024 el mercado global del almidón se valore entre \$ 67.1 y \$ 112 mil millones de dólares, a un creci-

miento anual compuesto (CAC) de entre 5.75 y 5.90 %, esto de acuerdo con la amplia gama de aplicaciones industriales que posee (Tabla 1). Dichas aplicaciones están relacionadas con los cambios estructurales que sufre el almidón [5]. Si no se le realiza ninguna alteración y la extracción es directa de la fuente vegetal se le denomina almidón nativo, mientras que al almidón que ha tenido transformaciones biológicas, químicas o físicas se le denomina almidón modificado.

### Estrategias para la modificación del almidón

Las modificaciones al almidón se han propuesto de acuerdo a las mejoras que se requieren a nivel industrial [4]. Estos cambios moleculares se enfocan principalmente en generar beneficios demostrables en ciertas propiedades, tales como disminución de la temperatura de gelatinización, incremento de la viscosidad, mayor claridad de pastas, incremento de la capacidad de gelificación, estabilización de emulsiones, mayor capa-

cidad para retener lípidos, entre otras. Esto tiene la finalidad de disminuir costos a nivel de producción y mejorar los productos en los que se emplean.

Un ejemplo de este tipo de modificaciones (Figura 2) son las físicas, las cuales implican tratamientos libres de productos químicos que alteren la composición estructural del gránulo y dentro de ellas se encuentran las térmicas, no térmicas y otras. Las modificaciones químicas introducen compuestos químicos permitidos por la agencia de Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA), mediante reacciones químicas que se llevan a cabo entre las cadenas poliméricas del almidón y estas se engloban principalmente en la etificación, esterificación, entrecruzamiento, oxidación y cationización. Finalmente, las modificaciones enzimáticas alteran la estructura molecular del almidón a través de enzimas, principalmente hidrolíticas [10].

Tabla 1. Aplicaciones del almidón

| Industrias  | Ingresos 2020<br>(millones de dólares) | Función   | Aplicación  | Referencia |
|---|--|---|---|------------|
| Alimentaria   | 32 000                                 | Materia prima, aditivos, estabilizadores, recubrimientos, edulcorantes.   | Helados, dulces, prebióticos, salsas, mayonesas, ketchups, mermeladas, budines, rellenos de frutas para confitería, carne y verduras enlatadas, yogures y alimentos congelados. | [6]        |
| Forraje   | 2 000                                  | Nutriente, espesante, aglutinante.  | Piensos y forrajes.   | [5]        |
| Papelera  | 16 000                                 | Espesante, encolador, aglutinante, proveedor de resistencia mecánica.   | Papel, cartón, adhesivos, filtros.  | [7]        |
| Farmacéutica  | 3 000                                  | Excipientes, aerogeles, cubiertas, estabilizantes, acarreador de dextrosa, hidrogeles.  | Tabletas, cubiertas de cápsulas, polvos, gel antiséptico, bioadhesivos, micelas con medicamentos.   | [8]        |
| Otras (química, minera, textil, construcción, polimérica y cosmética) | 3 000                                  | Recubrimientos, depresores, agentes de flotación, encoladores, espesantes, coloides, protectores, aglutinantes, electrolitos sólidos. | Bioplásticos, biocombustible, etanol, adhesivos, telas.   | [9]        |

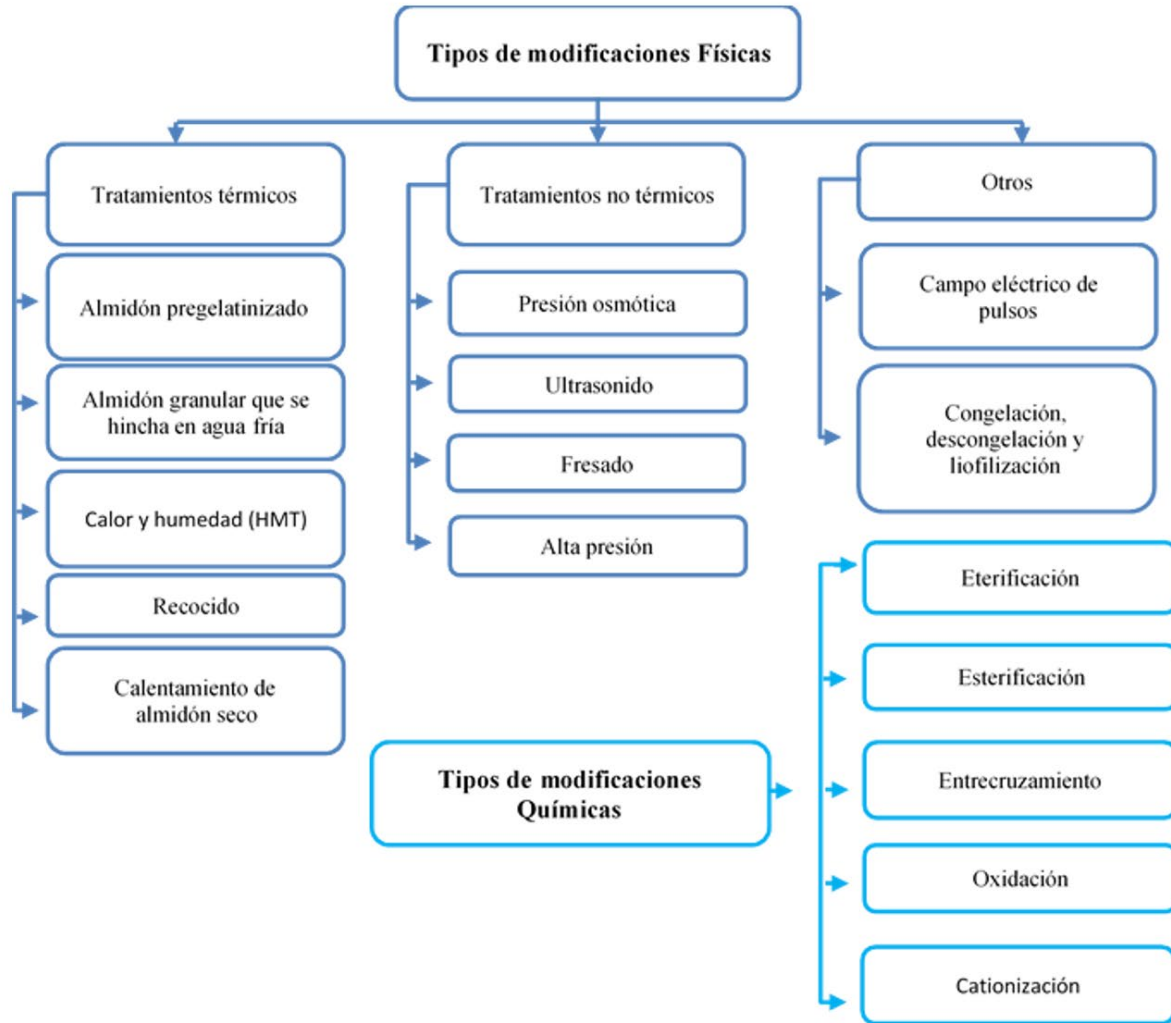


Figura 2. Clasificación de tratamientos empleados durante las modificaciones físicas y químicas del almidón [11]

### ¿Qué es la modificación dual?

Los diferentes métodos de modificación al almidón nativo favorecen el incremento de sus propiedades, sin embargo, las modificaciones únicas de los almidones han resultado ser ineficaces cuando se necesita más de una propiedad a otorgar. Esto implica, por ejemplo, el aumento de los costos al emplear otros compuestos, utilizar dos o más almidones con propiedades específicas o incluso integrar aditivos en las diferentes industrias de interés. Derivado de estos inconvenientes surge la necesidad

de combinar métodos de modificación física, química y/o enzimática y a esto se le denomina modificación dual.

### Clasificación de las modificaciones duales

La modificación dual puede clasificarse en modificaciones químicas duales, físicas duales y enzimáticas duales. Estas, a su vez, se dividen en dos tipos de modificaciones, las cuales son modificación homo dual y hetero dual. Una modificación homo dual se da cuando el almidón es tratado por dos

métodos similares, es decir, el almidón es modificado químicamente en primer lugar por entrecruzamiento y posteriormente se esterifica. Por otra parte, la modificación heterodual altera al almidón por dos métodos distintos, ejemplo de esto es combinar un método físico seguido de un método químico y a este tipo de modificación también se le conoce como modificación heterogénea dual [12] (Figura 3).

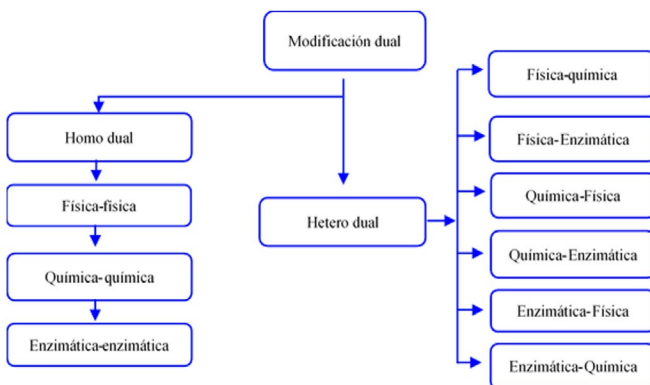


Figura 3. Clasificación de la modificación dual [12]

### Métodos para caracterizar e identificar los almidones modificados dualmente

Después de llevar a cabo las metodologías seleccionadas para la obtención del almidón modificado dualmente es necesario realizar la identificación y caracterización macro y microestructural para comprobar que se llevaron a cabo de manera exitosa las alteraciones a las moléculas del almidón (amilosa y amilopectina), ya sea por vías físicas, químicas o enzimáticas. En la Figura 4 se observa la estructura química de un almidón homo dual modificado, resultante de una modificación por esterificación y entrecruzamiento donde se incorporaron dos tipos de reactivos modificadores y se formaron enlaces covalentes que refuerzan la estructura química del almidón, además de dar una doble funcionalidad, con fines específicos.

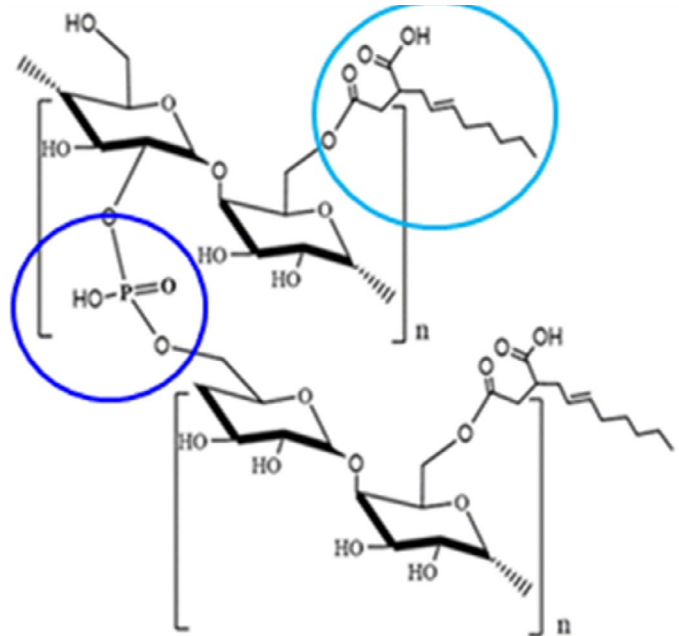


Figura 4. Almidón homodual modificado por método químico-químico. Reactivo modificador entrecruzante (compuesto con fósforo) y esterificante (anhídrido)

Dentro de las propiedades que identifican que dichas modificaciones fueron efectivas se mencionan algunas de ellas:

- Químicas: grado de sustitución y contenido de amilosa y amilopectina.
- Propiedades funcionales: claridad de pasta, sinéresis (pérdida de agua), poder de hinchamiento, índice de absorción de agua, índice de solubilidad de agua e índice de absorción de lípidos.
- Propiedades físicas: estudio reológico, calorimetría diferencial de barrido, difracción de rayos X, cristalinidad, propiedades microestructurales mediante microscopía electrónica de barrido, óptica, confocal y fuerza atómica, espectroscopia infrarroja, tamaño de partícula, entre otras [13].

### La importancia de la reología en el estudio de almidones con modificaciones duales

El objetivo principal de las modificaciones es observar los efectos de manera directa o indirecta de cómo las distintas meto-



dologías de modificación dual benefician las propiedades físicas y funcionales con respecto a las del almidón nativo. Una determinación que de manera indirecta da resultados del comportamiento después de la modificación es la reología. La reología es la ciencia que estudia el flujo y las deformaciones de los materiales, siendo una rama de la mecánica del medio continuo que observa la relación entre el esfuerzo y la deformación en condiciones de flujo impuestas al material [14, 15]. Es decir, para observar la respuesta de las alteraciones intermoleculares después de una modificación homo dual por método químico-químico, donde el resultado esperado es un incremento de la respuesta viscosa en dispersiones de almidón gelatinizado, se realiza la prueba de flujo cortante simple en estado estacionario en un sistema reométrico (cono y plato 2°) (Figura 5).

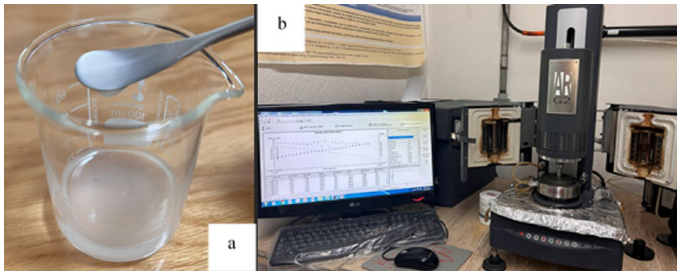


Figura 5a. Muestra de almidón modificado dualmente por método químico-químico 5b. Determinación de comportamiento al flujo en un reómetro de esfuerzo controlado ARG2

Las curvas de viscosidad respecto al flujo de los almidones modificados dan información de la repuesta viscosa al ser sometidos a esfuerzos cortantes y rapidezces de deformación, dichos datos pueden ajustarse a un modelo reológico que describa su comportamiento. En el caso de la Figura 6, los datos se ajustan a la ley de la potencia donde los parámetros reológicos de dicho modelo sugieren qué tratamiento presenta

mayor estabilidad de la matriz polimérica al flujo, esto, posiblemente por los enlaces covalentes que se formaron durante la modificación química dual y el beneficio de las interacciones efectivas resultantes [12].

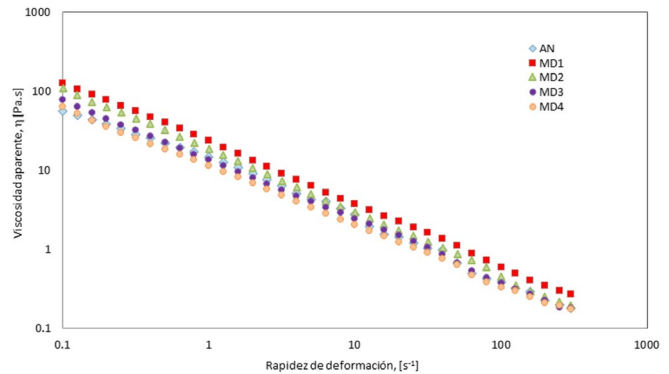


Figura 6. Curvas de flujo de almidones modificados dualmente ensayados a 4 niveles de concentración por métodos químicos; AN=almidón nativo; MD1=Almidón dualmente modificado 1; MD2=Almidón dualmente modificado 2; MD3=Almidón dualmente modificado 3 y MD4=Almidón dualmente modificado 4

Los parámetros reológicos del modelo de Ostwald de Waele o ley de potencia se muestran en la Tabla 2, donde se aprecia que el comportamiento de los fluidos es no newtoniano de tipo adelgazante para los diversos tratamientos. Lo anterior se expresa por los valores del índice del comportamiento al flujo  $n < 1$  (0.2073 a 0.3819). Los datos del índice de consistencia (K) son directamente proporcionales al valor de la viscosidad y se observa que el tratamiento 1 (MD1) exhibió una viscosidad 1.6 veces mayor que el almidón nativo, esto debido a que conforme incrementa la concentración de los reactivos modificantes incrementa el número de enlaces covalentes entre las cadenas poliméricas del almidón, lo que sugiere distintos rearrreglos moleculares para cada tratamiento.

Estos parámetros permiten seleccionar de manera inicial un tratamiento con respecto a los otros ensayados mediante los cam-

| Tratamiento | Viscosidad<br>$\eta$ (Pa.s) | K<br>(Pa.s <sup>n</sup> ) | n      | R <sup>2</sup> |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|--------|----------------|
| AN          | 16.78                       | 14.89                     | 0.3819 | 0.9866         |
| MD1         | 28.04                       | 27.57                     | 0.2298 | 0.9937         |
| MD2         | 18.72                       | 18.22                     | 0.2073 | 0.9843         |
| MD3         | 14.09                       | 13.46                     | 0.2372 | 0.9847         |
| MD4         | 11.53                       | 11.18                     | 0.2554 | 0.9817         |

Tabla 2. Parámetros reológicos de almidones dualmente modificados por métodos químicos AN=almidón nativo; MD1=Almidón dualmente modificado 1; MD2=Almidón dualmente modificado 2; MD3=Almidón dualmente modificado 3 y MD4=Almidón dualmente modificado 4; K=índice de consistencia; n=índice de comportamiento al flujo y R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación

bios en la viscosidad, después de la doble modificación al almidón nativo, indicando si se favorece o no la estabilidad de la matriz polimérica. Estos resultados, sumados a otras determinaciones físico-químicas (como pruebas reológicas oscilatorias, rayos X, cristalinidad, potencial z, tamaño de partícula, espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, grado de sustitución, propiedades funcionales, entre otras), caracterizarán y confirmarán qué modificación es la más adecuada para ser sujeta a cierta aplicación a condiciones impuestas [15, 16].

Posteriormente, es necesario que (una vez seleccionada la modificación dual con las propiedades físicas, químicas y funcionales adecuadas para la obtención de un biomaterial específico) durante el diseño de este biomaterial se realice todo el estudio reológico de las propiedades viscosas, viscoelásticas y elásticas. Las anteriores (asociadas con otras determinaciones específicas para caracterizar al biomaterial) contribuirán al procesamiento óptimo del mismo.

### Aplicaciones de almidones modificados dualmente en biomateriales

Englobando todos los beneficios que posee el almidón nativo (y sus modificaciones con propiedades que les permiten participar en el diseño de biomateriales) se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas a las industrias farmacéutica, alimentaria y médica (Tabla 3). Se han obtenido excelentes resultados para continuar implementando esta línea de investigación con beneficios para la salud humana.

### Conclusiones

El diseño y aprovechamiento de los almidones modificados dualmente a partir de fuentes convencionales y no convencionales permite ampliar la gama de aplicaciones en la industria, de acuerdo con las nuevas propiedades que estos exhiben. Estos almidones disminuyen costos de producción al otorgar mejores propiedades físicas, químicas y funcionales en los procesos en los que se emplean, evitando que se requiera emplear otro aditivo, sustancia o compuesto. Su participación en el área

| Industria           | Modificaciones                              | Fuente de almidón       | Referencia                                   | Función   | Aplicación  |
|---------------------|---|-------------------------|--|---|---|
| <b>Farmacéutica</b> | Ácida/ química                              | Tapioca                 | Oladzadabbasabadi et al., (2017)             | Materiales biocompatibles y biodegradables.   | Cápsulas duras y recubrimiento de productos farmacéuticos.  |
|                     | Doble entrecruzamiento                      | Maíz                    | Yun, et al., (2022)                          | Sistemas de administración de fármacos.<br><br>Acumulación selectiva en tejido canceroso (solubilidad del fármaco liposoluble en medio acuoso). | Encapsulación de medicamentos hidrófobos (vitaminas y quimioterapia).<br><br>Micelas (fármacos antitumorales con liberación controlada y sostenida).  |
|                     | Enzimática/química                          | Maíz                    | Zhi et al., (2021)                           | Encapsulación de aceites y compuestos funcionales.<br><br>Soporte de fármacos.  | Nanoesferas funcionales.  |
|                     | Entrecruzamiento                            | Varias fuentes          | Davidovich-Pinhas, (2016)                    | Apoyo a la regeneración de la piel.   | Biogeles.<br><br>Parches y apósitos.  |
|                     | Térmica/química                             | Trigo                   | Chen et al., (2023)                          | Encapsulación de ácidos grasos poliinsaturados.   | Microcápsulas funcionales.  |
| <b>Alimentaria</b>  | Entrecruzamiento/químico                    | Papa                    | Bajer y Burkowska, (2022)                    | Empaques biodegradables (disminución de la huella ecológica).   | Bioplásticos.   |
|                     | Doble entrecruzamiento                      | Maíz                    | Peidayesh et al., (2021)                     | Almidón termoplástico.  | Utensilios comestibles y envolturas.  |
|                     | Físico/químico;<br>Entrecruzamiento/químico | Papa, maíz, trigo, yuca | Zhou et al., (2014);<br>Zhang et al., (2022) | Empaques funcionales nutraceuticos con mezcla de polímeros.   | Biopelículas con compuestos bioactivos, marcadores y polímeros (antioxidantes, bacteriostáticos, detectores de maduración, conservadores, mucílagos, ácido poliláctico, alcohol polivinílico, policaprolactona, entre otros). |

|               |                          |              |   |  |  |
|---------------|--------------------------|--------------|---|--|--|
|               | Doble entrecruzamiento   | Yuca, varios | Sriprabhom et al., (2023);<br>Chen et al., (2023) | Emulsificantes, espesantes y estabilizadores.  | Aditivos alimentarios para emulsiones, suspensiones, productos enlatados, congelados y refrigerados.   |
|               | Entrecruzamiento/térmico | Maíz         | Liu et al., (2021)                                | Oleogeos anfífilicos bioaccesibles, sustitutos de grasas.  | Texturizantes para muffins, masa para galletas, pasteles, untables, chocolate (reducido en grasa), queso, mantecas comerciales o sucedáneos de la margarina y productos cárnicos (salchichas, hamburguesas y paté de cerdo). |
| <b>Médica</b> | Enzimática/enzimática    | Arroz        | Zhou et al., (2014)                               | A partir de su metabolización, producción de ácidos grasos de cadena corta a nivel intestinal, disminución de lípidos, insulina y glucosa en suero, aumenta la eliminación de lípidos por heces fecales. | Fibra dietaria (almidones resistentes).  |

de biomateriales promueve el desarrollo de nuevas investigaciones que coadyuvan al beneficio del ser humano, con el fin de tener alternativas bioaccesibles, biocompatibles y biodegradables.

La Reología es de gran importancia para el estudio de los almidones con modificaciones duales debido a que facilita obtener un amplio conocimiento de su comportamiento viscoso y viscoelástico. Con ello, se pueden seleccionar de manera indirecta los tratamientos que presentan cambios a nivel molecular (micro) y que sugieren mayor estabilidad de las nuevas matrices poliméricas. Finalmente, los estudios reo-

lógicos contribuyen al diseño integral de biomateriales con fines específicos y en la manufactura de diversos equipos para su procesamiento, siendo de gran apoyo para el área científica y tecnológica.

### Referencias

[1] Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., & Karim, A. A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26(2), 398-404.

[2] Amukarimi, S., Ramakrishna, S., & Mozafari, M. (2021). Smart biomaterials - A proposed definition and overview of the field. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 19, 100311. <https://doi:10.1016/j.cobme.2021.100311>

[3] Ogunsona, E., Ojogbo, E., & Mekonnen, T. (2018). Advanced material applications of starch and its derivatives. *European Polymer Journal*.

[4] Santana, A. L & Meireles, M. A. A. (2014). New Starches are the Trend for Industry Applications: A Review. *Food and Pu-*

- blic Health 4(5): 229-241. <https://doi.org/10.5923/j.fph.20140405.04>
- [5] Adewale, P., Yancheshmeh, M. S., & Lam, E. (2022). Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review. *Carbohydrate Polymers*, 291, 119590. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590>
- [6] Gałkowska, D., & Juszczak, L. (2019). Effects of amino acids on gelatinization, pasting and rheological properties of modified potato starches. *Food Hydrocolloids*, 92, 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.063>
- [7] Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O., & Kumar, A. (2017). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels - A Review. *RSC Advances*, 7(61), 38604-38630. <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>
- [8] Kurczewska, J. (2022). Recent Reports on Polysaccharide-Based Materials for Drug Delivery. *Polymers*, 14(19), 4189. <https://doi.org/10.3390/polym14194189>
- [9] Chen, K., & Zhang, H. (2020). Fabrication of Oleogels via a Facile Method by Oil Absorption in the Aerogel Templates of Protein-Polysaccharide Conjugates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(6), 7795-7804. <https://doi.org/10.1021/acscami.9b21435>
- [10] Núñez-Bretón, L. C., Cruz-Rodríguez, L. C., Tzompole-Colohua, M. L., Jiménez-Guzmán, J., Perea-Flores, M. D. J., Rosas-Flores, W., & González-Jiménez, F. E. (2019). Physicochemical, functional and structural characterization of Mexican Oxalis tuberosa starch modified by cross-linking. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(4), 2862-2870. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00207-3>
- [11] Chimonyo, W., Fletcher, B., & Peng, Y. (2020). Starch chemical modification for selective flotation of copper sulphide minerals from carbonaceous material: A critical review. *Minerals Engineering*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.1065>
- [12] Omodunbi Ashogbon, A. (2020). Dual modification of various starches: Synthesis, properties and applications. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.1283>
- [13] Makroo, H., Naqash, S., Saxena, J., Sharma, S., Majid, D., & Dar, B. (2021). Recovery and characteristics of starches from unconventional sources and their potential applications: A review. *Applied Food Research*, <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100001>.
- [14] Barnes, H. A., Hutton, J.F., & Walters, K. (1989). *An Introduction to Rheology*. Rheology Series, Book series. Elsevier, 3, 1-199.
- [15] Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. 1-428.
- [16] Bajer, D., & Burkowska-But, A. (2022). Innovative and environmentally safe composites based on starch modified with dialdehyde starch, caffeine, or ascorbic acid for applications in the food packaging industry. *Food Chemistry*, 374, 131639. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131639>



# Biomateriales y sus generaciones

**María Cristina Piña Barba**

Laboratorio de biomateriales, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México  
[crispina99@gmail.com](mailto:crispina99@gmail.com)

Un biomaterial es aquel que está en condiciones de ser aceptado (o tolerado) por el organismo y puede ser de origen natural o sintético, en tanto cumpla con las siguientes condiciones:

1. Ser biocompatible: debe ser tolerado por el organismo y viceversa (ni él ni sus productos de degradación podrán ser tóxicos para el organismo).
2. Ser químicamente estable, a menos de que se requiera su degradación dentro del organismo.
3. Ser esterilizable.



## 1ra Generación

- Se desarrollaron entre 1960 y 1970.
- No estaban pensados para interactuar con el mundo biológico, con que sustituyeran al tejido dañado y con que el material fuera semejante en su función (sin que el organismo se viera afectado), bastaba.
- Se buscaba que las propiedades físicas coincidieran con las del tejido reemplazado y que no fueran tóxicos. Idealmente "inertes" (aunque ahora sabemos que no hay ninguna posibilidad de que haya materiales inertes en el organismo, ya que éste siempre reaccionará a la presencia de cualquier material).



## 2da Generación

- Tienen como objetivo reparar los tejidos, ya no se buscan materiales inertes sino bioactivos y/o biodegradables.
- Los bioactivos reaccionan químicamente con los tejidos formando un fuerte enlace interfacial implante-tejido huésped. Hay hidroxiapatita, compuestos de titanio/hidroxiapatita, vidrios bioactivos, cerámicas vítreas y están en implantes dentales y prótesis ortopédicas.
- Los bioreabsorbibles (o biodegradables) se diseñan para degradarse gradualmente y ser reemplazados por el tejido huésped. Están en la sutura reabsorbible, reconstrucciones óseas, material de relleno en cirugía maxilofacial y ortopédica. Ejemplos son la hidroxiapatita porosa, el fosfato tricálcico y el cemento de hidroxiapatita.

## 3ra Generación

- El objetivo es la regeneración del tejido.
- Se ha pasado de utilizar materiales inertes para sustitución de tejidos vivos, al diseño de materiales bioactivos y biodegradables.
- Interactúan con el tejido de forma específica, mediante estímulos a nivel celular y molecular, y son la base para los andamios celulares que se emplean en la ingeniería de tejidos.
- Sus propiedades superficiales (textura, pH, carga eléctrica, magnética, etc.) son fundamentales para una respuesta positiva del organismo.
- Deben ser porosos y sus poros deben ser abiertos e intercomunicados.
- Facilitan la formación de una red vascular capaz de proporcionar oxígeno y nutrientes necesarios para el metabolismo celular.
- Se asegura su permanencia, mientras sean requeridos, y su desaparición una vez cumplida su función (deberán degradarse con la velocidad adecuada, pues a medida que crece el tejido el andamio debe ir desapareciendo sin originar productos de degradación tóxicos ni desencadenar una respuesta inmunológica).

Los biomateriales avanzan a pasos agigantados. Tanto que, en la actualidad, aún no existen ejemplos de materiales de tercera generación que cumplan cabalmente la totalidad de las características antes citadas. Lo que sí podemos decir es que, en pocos años de evolución, hemos pasado de:

**SUSTITUIR → REPARAR → REGENERAR**



# Aleaciones de alta entropía: materiales emergentes con un futuro prometedor

J. Zamora<sup>1,2</sup>, Rafael. G. Suarez<sup>1</sup>, M. A. Camacho-Peralta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM

Circuito Exterior S/N Circuito de la Investigación Científica, Cd. Universitaria, 04510, Ciudad de México, CDMX

<sup>2</sup> Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICYT A.C.

Camino a la Presa de San José 2055, Lomas 4ta sección, C.P. 78216. San Luis, S.L.P.

[zamenj@materiales.unam.mx](mailto:zamenj@materiales.unam.mx)

## Resumen

El estudio y fabricación de nuevas aleaciones, como lo son las de alta entropía, ha captado el interés de la comunidad científica debido a sus atractivas e inusuales propiedades. Estas brindan la oportunidad de desarrollar materiales complejos aplicables en campos, tanto convencionales como emergentes. Sin embargo, se enfrenta un gran reto en la comprensión de las propiedades que puedan llegar a presentar este tipo de materiales, ya sea por la diversidad en los procesos de fabricación, los elementos que los conforman, la continua manufactura de nuevas aleaciones y la falta de estudio en los diversos sistemas que se han reportado actualmente. Esto se traduce como una motivación para futuras investigaciones.

## Palabras clave

Aleaciones, microestructura, propiedades mecánicas, propiedades magnéticas.

## Introducción

A través del tiempo, la metalurgia ha tenido como bases el diseño y desarrollo de aleaciones a partir de elementos base, cuyas propiedades mecánicas habían sido consideradas como prioritarias. Sin embargo, conforme mejoraron y se especializaron los procesos de manufactura se observó que las propiedades químicas, eléctricas, ópticas y magnéticas también eran de gran relevancia para aplicaciones no convencionales, es decir, donde se requería más que una buena resistencia mecánica. Además, se evidenció que dichas propiedades pueden modificarse al adicionar pequeñas cantidades de otros elementos aleantes, lo que permite que se tengan mejores rendimientos. Este conocimiento se ha preservado desde los inicios de la metalurgia, pero se limita básicamente al equilibrio de las fases presentes en una aleación, para sistemas binarios y ternarios, dando origen a la formulación de la regla de las fases de Gibbs. Dicha regla establece el



número de fases y grados de libertad que tendrá un sistema respecto al número de componentes que lo conforman. Con base en esta regla, se podría pensar que las aleaciones multicomponentes formadas por cinco o más elementos darían como resultado la formación de compuestos intermetálicos, con una estructura compleja cuyo análisis representaría todo un reto debido a la posibilidad de la presencia de un gran número de fases. Estas expectativas desalentaron el estudio de sistemas multicomponentes.

A principios del siglo XXI, Wei Yeh y Brian Cantor reportaron de forma independiente la factibilidad de la fabricación de aleaciones multicomponentes equiatómicas, acuñando por primera vez el nombre de aleaciones de alta entropía (HEAs, por sus siglas en inglés) [1-2]. Esto significó un parteaguas en términos del concepto de aleación, lo cual propició un auge para la comunidad científica respecto a la investigación a nivel mundial de estos nuevos materiales. Esto dio como resultado que, en los últimos años, las HEAs hayan captado tanto interés, puesto que se trata de una alternativa prometedora con relación a las aleaciones convencionales. Aunque las HEAs poseen valores de entropía de mezcla ( $\Delta S_{mez}$ ) más altos que los metales puros, la mejora de las propiedades en este tipo de aleaciones son consecuencia de  $\Delta S_{mez}$  que permite la adición de elementos apropiados para aumentar y mejorar sus propiedades (físicas, químicas, mecánicas y magnéticas). Por lo tanto, se han diseñado composiciones cada vez más complejas con valores de  $\Delta S_{mez}$  más altos. Aunque tales composiciones no garantizan una microestructura compleja o que el sistema presente una disminución en su respuesta mecánica o física. En cambio, una entropía de mezcla significativamente

mayor a partir de composiciones complejas puede simplificar la microestructura y propiciar propiedades atractivas en las aleaciones como lo son: una alta estabilidad térmica, dureza extremadamente alta, excelentes propiedades anticorrosivas, así como propiedades termofísicas especiales [3-5].

Actualmente, continúa la discusión sobre la influencia de la composición de la aleación, la estructura cristalina, la fracción de fase y los parámetros de procesamiento en las propiedades de estas aleaciones. Motivo por el cual se emplean métodos convencionales (fundición por horno de arco eléctrico, horno de inducción, aleado mecánico y solidificación rápida) junto a técnicas avanzadas de alto rendimiento (manufactura aditiva y codeposición) que comenzaron a ganar popularidad en la fabricación de HEAs, estas permitieron mejorar el desempeño de las aleaciones mediante el aumento de su solubilidad y una microestructura más fina (incluso generando fases amorfas). Tan solo hasta el 2021 se habían reportado más de 300 HEAs con únicamente 30 elementos, y con más de 6 000 trabajos de investigación publicados sobre este tipo de materiales [6-7].

### ¿Cuándo una aleación es de alta entropía?

Las soluciones sólidas metálicas tienen diferentes clasificaciones, pero en el caso particular de la HEAs puede ser un poco confuso. La alta entropía hace referencia a la entropía de mezcla y cuando su valor es  $\Delta S_{mez} > 1.51R$  se considera de alta entropía, donde  $R$  es la constante de los gases. Esto se conoce como la definición base de entropía. Sin embargo, a partir de esta definición es posible diferenciar a las aleaciones de media y baja entropía (MEA y LEA, por sus

siglas en inglés, respectivamente). Para las aleaciones MEA y LEA, se consideran los siguientes intervalos de entropía de mezcla respectivamente [8]:

La entropía de mezcla de las HEAs se puede estimar por medio de la siguiente ecuación [8]:

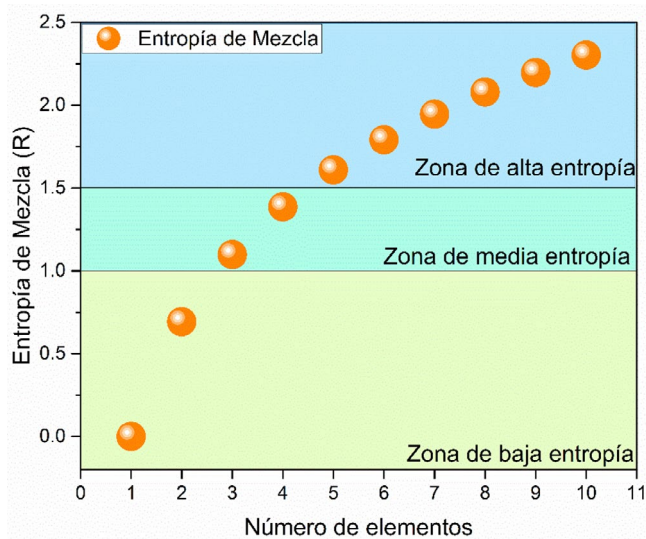


Figura 1. Entropía de mezcla en función del número de elementos constituyentes de la aleación

ción [8]:

Donde  $R$  es la constante de los gases y  $c_i$  la fracción molar del elemento

$$\Delta S_{mez} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i$$

Entre las HEAs más estudiadas se encuentra la aleación  $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$  cuya entalpia de mezcla es aproximadamente:

Considerando que es una relación equimolar es decir

$$c_{Cr} = c_{Mn} = c_{Fe} = c_{Co} = c_{Ni}$$

Una conclusión si ó n

$$\Delta S_{mez} = -R [5 c_{Cr} \ln c_{Cr}] \approx 1.61R$$

obvia es que, para obtener valores de alta entropía de mezcla, las aleaciones deben contener por lo menos cinco elementos

principales cuya composición sea de entre:  $5 \% \text{ at.} \leq C_i \leq 35 \% \text{ at.}$

También pueden contener elementos minoritarios con valores de:  $0 \% \text{ at.} \geq C_j \leq 5 \% \text{ at.}$  Lo antes mencionado se conoce como la definición de base composición; la cual no se basa en la entropía, sino en la variedad de elementos metálicos que contiene la aleación y en su porcentaje atómico.

En caso de que las aleaciones multicomponentes no tengan la misma relación molar también pueden entrar en la categoría de alta entropía. Ninguna de las definiciones anteriores condiciona al hecho de tener la misma cantidad porcentual.

### ¿Qué beneficios presentan las HEAs?

Las propiedades de las HEAs se deben a la combinación de cuatro efectos fundamentales: a) alta entropía: aumenta la solubilidad de los elementos constituyentes, reduce la formación de fases y simplifica su microestructura; b) fuerte distorsión de la red: se debe a la diferencia de los radios atómicos de los elementos, el movimiento de las dislocaciones se dificulta y se hace más lento, lo que aumenta su resistencia mecánica; c) lenta difusión: aumenta su estabilidad térmica y temperatura de recristalización al ralentizar el crecimiento de los granos se mejora la resistencia a la cedencia a altas temperaturas, y d) efecto coctel: las propiedades de las HEAs se asocia a las propiedades de los elementos que las componen, al igual que la interacción entre estos mismos; resulta en una elevada dureza, elevada resistencia a la cedencia bajo compresión tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas, alta resistencia a la fractura y buena ductilidad.

La resistencia a la corrosión de estas aleaciones se debe en muchos casos a su composición química, donde algunos elementos como el aluminio y el titanio forman óxidos superficiales, confiriéndoles una buena resistencia a la corrosión.

Además, se ha observado que las HEAs con una estructura cristalina FCC presentan valores menores de esfuerzo de cedencia bajo compresión y una mayor plasticidad, mientras que las aleaciones tipo BCC muestra valores de esfuerzo de cedencia y resistencia a la fractura superiores, pero valores de plasticidad inferiores.

### ¿Qué microestructura presentan las HEAs?

En las HEAs la alta entropía de mezcla juega un papel crucial al aumentar la solubilidad entre los elementos constituyentes y de esta forma reduce el número de fases presentes, que en algunos casos permite la formación de una sola fase o un número pequeño de estas con un intervalo alto de solubilidad, lo que simplifica su microestructura. Aunado a esto, otros efectos como la fuerte distorsión de la red, la lenta difusión y el efecto coctel generados por la combinación multicomponente de la aleación dan como resultado una estructura simple con una serie de propiedades atractivas. Este es uno de los motivos por el que las principales propiedades se correlacionan con la respuesta mecánica y microestructural para el desarrollo de nuevos materiales estructurales. La estructura cristalina típica de estas aleaciones pueden ser FCC, BCC, HCP o FCC+BCC (FCC, BCC y HCP, por sus siglas en inglés). A medida que se estudiaban cada vez más los sistemas multicomponentes equiatómicos, se comenzaron a considerar aleaciones no equiatómicas y con menores restricciones.

Lo que dio origen a las aleaciones de composición compleja (CCAs, por sus siglas en inglés) [9], este tipo de aleación únicamente tiene tres elementos base, a diferencia de HEAs antes descritas. La principal diferencia entre ambas aleaciones radica en el hecho que las CCAs se investigan en la sección central de los diagramas de fase multicomponente, y como consecuencia provoca un número ilimitado de potenciales aleaciones y aplicaciones. Asimismo, existe el interés de fabricar aleaciones a partir de metales de transición 3D aleados con elementos refractarios [10]. Lo que implicaría que su estructura cristalina sea compleja y única, de igual manera que las propiedades de estas aleaciones las vuelvan atractivas para una amplia gama de aplicaciones industriales.

Cabe mencionar que las HEAs también pueden presentar una estructura amorfa y se conocen como aleaciones de alta entropía amorfas o como bultos metálicos de alta entropía (BM-HEAs, por sus siglas en inglés) que se definen como aquellas aleaciones compuestas por cuatro o más elementos equimolares enfriados súbitamente desde un estado líquido o gaseoso. Y al no tener límites de grano, las aleaciones amorfas presentan una mayor resistencia al desgaste, la fatiga y la corrosión en comparación con las aleaciones cristalinas con ordenamiento de largo alcance. Algunos ejemplos que corresponden a los BM-HEAs son:  $Ti_{20}Zr_{20}Cu_{20}Ni_{20}Be_{20}$ ,  $Ca_{20}Mg_{20}Zn_{20}Sr_{20}Yb_{20}$ ,  $Fe_{25}Co_{25}Ni_{25}(B, Si)_{25}$  o  $FeCrSiNb$  [11-12].

### ¿Cómo se clasifican las HEAs?

Las aleaciones de alta entropía se pueden clasificar de diferentes maneras (a consideración del grado de interés para el clasificador), ya que propiamente no hay una clasificación estandarizada. A continuación,

se mencionan algunas de las clasificaciones posibles:

- De acuerdo con la composición: combinaciones de elementos de transición, elementos refractarios o elementos no metálicos.
- De acuerdo con la estructura cristalina: aleaciones cristalinas simples o las aleaciones de fase múltiple (FCC, BCC, HCP o FCC+BCC).
- De acuerdo con las propiedades: mecánicas, electrónicas, químicas, magnéticas, térmicas, eléctricas, etc.
- De acuerdo con la aplicación: aeronáutica, ingeniería estructural, fabricación de herramientas, energía y electrónica.

Este tipo de clasificación no es definitiva, debido al desarrollo constante de aleaciones con nuevas composiciones que pueden determinar nuevos aspectos para su clasificación.

## ¿Qué hay sobre las propiedades de las HEA?

De acuerdo con lo reportado en algunas revisiones de años pasados [13-14] los ámbitos principales en los cuales se enfocaron los artículos con la palabra "*High-entropy*" hasta el 2021, fueron:

1. Microestructura (1 111 artículos).
2. Propiedades Mecánicas (1 000 artículos).
3. Corrosión (256 artículo).
4. Propiedades magnéticas (146 artículo).
5. Transición de fase (69 artículos).
6. Revisiones (63 artículos).
7. Termodinámica (57 artículos).
8. Efecto magnetocalórico (25 artículos).
9. Catálisis (20 artículos).
10. Termoelectricidad (18 artículos).
11. Memoria de forma (17 artículos).
12. Almacenamiento de hidrógeno (12 artículos).
13. Superconductividad (5 artículos).

Es evidente la disparidad de artículos entre propiedades mecánicas y microestructura con respecto a otras propiedades, como lo son las magnéticas. Por ejemplo, entre las propiedades mecánicas más importantes reportadas se encuentran: alta dureza, alta resistencia a la compresión, buena resistencia a la corrosión, oxidación y al desgaste, así como conservar estas propiedades a altas temperaturas. Estas propiedades las hacen potencialmente útiles para un gran número de aplicaciones industriales, como en herramientas, moldes, dados, piezas para hornos, ductos marinos y componentes de bombas que requieren buena tenacidad, estabilidad térmica, resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste, oxidación y corrosión. En la tabla 1 se pueden observar valores de las propiedades mecánicas más importantes de algunas HEAs.

Por otro lado, la fabricación de HEAs que presentan un comportamiento magnético son una alternativa prometedora a los materiales metálicos magnéticos convencionales, dado que suelen presentar propiedades mecánicas deficientes. Esta clase de HEAs presentan un típico comportamiento de materiales ferromagnéticos suaves, es decir, poseen valores de magnetización de saturación intermedias y altas, así como campos coercitivos estrechos. Es más, algunas de estas aleaciones presentan comportamiento ferromagnético únicamente a bajas temperaturas y no a temperatura ambiente, lo cual depende de los elementos involucrados en la aleación, teniendo como valor agregado una buena respuesta mecánica en la mayoría de los casos. De entre las propiedades magnéticas, algunas como la coercitividad y la permeabilidad magnética son sensibles a la estructura cristalina, mientras que la magnetización de saturación y

| Aleación                    | Fabricación y procesamiento | Fases       | Propiedades mecánicas   |                                       |  |                        |                        |            | Saturación Magnética Ms <u>emu/g</u> | Ref. |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------------------|--|------------------------|------------------------|------------|--------------------------------------|------|
|                             |                             |             | Módulo de Young E (MPa) | Esfuerzo de cedencia $\sigma_y$ (MPa) | Resistencia a la fractura o esfuerzo máximo $\sigma_{MAX}$ (Mpa) | Deformación elástica % | Deformación plástica % | Dureza HV  |                                      |      |
| AlCoCrFeNi                  | HAE/ colada por inyección   | BCC         | 127                     | 1500                                  | 2830   | 1                      | 26.9                   |            | 15                                   |      |
| AlCoCrFeNiTi <sub>0.5</sub> | HAE/ colada por inyección   | BCC         | 177.7                   | 2260                                  | 3140   | 1.1                    | 23.3                   |            | 15                                   |      |
| AlCoCrFeNiTi <sub>1.0</sub> | HAE/ colada por inyección   | BCC         | 90.1                    | 1860                                  | 2580   | 1.7                    | 8.8                    |            | 15                                   |      |
| AlCoCrFeNiTi <sub>1.5</sub> | HAE/ colada por inyección   | BCC + Laves | 159.8                   | 2220                                  | 2720   | 1.3                    | 5.3                    |            | 15                                   |      |
| CuCoCrFeNi                  | HAE/ colada por succión     | FCC         | 55.6                    | 230                                   | 888  | 0.56                   | 50.2                   | 1.505 (2T) | 16                                   |      |
| CuCoCrFeNiTi <sub>0.5</sub> | HAE/ colada por succión     | FCC         | 98.6                    | 700                                   | 1650   | 0.8                    | 21.6                   | 0.333 (2T) | 16                                   |      |
| CuCoCrFeNiTi <sub>0.8</sub> | HAE/ colada por succión     | FCC + Laves | 128.3                   | 1042                                  | 1848   | 0.86                   | 2.11                   | 1.368 (2T) | 16                                   |      |
| CuCoCrFeNiTi <sub>1.0</sub> | HAE/ colada por succión     | FCC + Laves | 76.5                    | 1272                                  | 1272   | 1.6                    | 0                      | 1.511 (2T) | 16                                   |      |
| CuCoCrFeNiAl <sub>1.0</sub> | HAE/Splat-quenched          | FCC + BCC   | 163                     | 950                                   |  |                        |                        | 400        | 1                                    |      |
| CuCoCrFeNiAl <sub>2.0</sub> | HAE/Splat-quenched          | FCC+BCC     |                         | 1600                                  |  |                        |                        |            | 1                                    |      |

Tabla 1. Propiedades mecánicas más sobresalientes de algunos sistemas de HEAs

la temperatura de Curie dependen de la composición elemental y las fases resultantes. De igual forma, la respuesta mecánica depende de los elementos constituyentes. A continuación, se presentan datos sobre el desempeño magnético y mecánico de algunas HEAs, ver tabla 2.

Una de las aplicaciones potenciales donde más han llamado la atención las HEAs es en la refrigeración magnética de estado sólido, el cual se basa en el efecto magnetocalórico (MCE, por sus siglas en inglés). En el caso particular del MCE, a pesar la poca información disponible en el 2021, se ha generado un interés particular en años recientes. Para finales de febrero del año 2023 el buscador Science direct mostraba 147 coincidencias con las palabras “High entropy” & “Magnetocaloric”.

Para quien no esté familiarizado con el MCE, se trata de una propiedad intrínseca de los materiales magnéticos, en la cual, hay un cambio de temperatura del material al verse inmerso en un campo magnético externo debido a variaciones de entropía en el material. Uno se puede preguntar, ¿cuál es el interés de este fenómeno? La respuesta está en su aplicación. En 2012, Brown y colaboradores [21] presentaron un reporte al departamento de energía de EU referente a las diferentes tecnologías alternativas que pueden ser usadas para refrigeración, tanto de alimentos como de espacios de vivienda. Dentro de las diferentes posibilidades destacan dos, el efecto termoacústico y el magnetocalórico. Estos dos fueron calificados como las mejores opciones para reemplazar el ciclo de refrigeración basado por compresión de vapor, debido sus altas eficiencias y estado de desarrollo.

| Aleación                                  | Fabricación y procesamiento                      | Fases   | Propiedades magnéticas              |                             |                                  | Propiedades mecánicas         |   |  | Ref.   |                   |
|---|--|---|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---|--|--------|-------------------|
|   |  |   | Saturación Magnética<br>Ms<br>emu/g | Coercitividad<br>Hc<br>(Oe) | Temperatura de Curie<br>Tc<br>°C | Módulo de Young<br>E<br>(MPa) | Esfuerzo de cedencia<br>$\sigma_y$<br>(MPa) | Resistencia a la fractura o esfuerzo máximo<br>$\sigma_{MAX}$<br>(MPa) |        | Microdureza<br>HV |
| AlCoCrFeNi                                | Aleado mecánico 30 h                             | BCC   | 47.77                               | 121.23                      |                                  |                               |   |  | 17     |                   |
| AlCoCrFeNi                                | Aleado mecánico 30 h/Sinterizado a 900 C por 2 h | NiAl(B2) + Ni <sub>3</sub> Al(L1 <sub>2</sub> ) + Fe/Co-Cr ( $\sigma$ ) | 70.05                               | 51.4                        | 640                              |                               | Estimado ~2700                              |  | 919±18 | 17                |
| AlCoCrFeNi                                | HAE/ colada por succión                          | BCC   | 65                                  | 52                          |                                  |                               | 1373  | 3531   | 520±11 | 18                |
| AlCoCrFeNiNb <sub>0.1</sub>               | HAE/ colada por succión                          | BCC   | 50                                  | ~ 55                        |                                  |                               | 1641  | 3285   | 569±11 | 18                |
| AlCoCrFeNiNb <sub>0.25</sub>              | HAE/ colada por succión                          | BCC + (Laves (HCP) + BCC)   | 45                                  | ~ 95                        |                                  |                               | 1959  | 3008   | 668±12 | 18                |
| AlCoCrFeNiNb <sub>0.5</sub>               | HAE/ colada por succión                          | BCC + (Laves (HCP) + BCC)   | ~ 20                                | ~ 85                        |                                  |                               | 2474  | 3170   | 747±10 | 18                |
| NiCoCrFe                                  | Aleado mecánico/spark plasma sintering           | FCC + BCC   | 83                                  | 9                           |                                  | 181.5                         |   |  | 622±7  | 19                |
| NiCoCrFeZr <sub>0.4</sub>                 | Aleado mecánico/spark plasma sintering           | FCC   | 70                                  | 21                          |                                  | 189.6                         |   |  | 845±10 | 19                |
| FeCoNiAl <sub>0.2</sub> Si <sub>0.2</sub> | HAE/colada por succión/Bridgman Solidification   | FCC   | 120                                 | 3.97                        |                                  |                               |   |  |        | 20                |

Tabla 2. Propiedades magnéticas y mecánicas de algunos sistemas de HEAs

Una de las brechas tecnológicas actuales la encontramos en el material que emplea este fenómeno y, por esta razón, la incursión en nuevos materiales que presenten MCE ha sido tan atractivo. Actualmente, diferentes aleaciones metálicas han sido estudiadas para su posible uso, no obstante, uno de los aspectos más importantes ha sido la temperatura en donde la fenomenología es máxima, es decir, la temperatura en la cual se encuentra la máxima variación de temperatura. Este cambio de temperatura ocurre en las temperaturas de transición entre estados de ordenamiento magnético. En el caso de aplicarse a nuestra vida cotidiana, esta debe rondar la temperatura ambiente. Las familias de materiales con MCE han reportado los siguientes intervalos donde se encuentra la temperatura de transición, véase tabla 3.

Actualmente, los reportes han mostrado que las aleaciones de alta entropía tienen transiciones en un intervalo extremadamente amplio, dependiendo de su composición, un aspecto muy diferente de las categorías de materiales con MCE antes citados. Aquellas que están compuestas principalmente por tierras raras presentan un intervalo de entre 10 y 120 K (véase Fig. 2a); mientras que las aleaciones que poseen diversos metales elevan su intervalo y rondan los 150 - 900 K, ver Fig. 2b.

Aunado a las ventajas que suelen presentar en propiedades mecánicas y de corrosión, que no poseen otros materiales magneto-calóricos convencionales, son el motivo por el cual siguen siendo materiales aptos para su posible aplicación.

| <i>Familia de Materiales</i>                       | <b>Intervalo aproximado donde se encuentra la <math>T_{\text{Transición}}</math> [K]</b> |
|--|--|
| <i>Fases de Laves</i>                              | 10-140   |
| <i>Aleaciones <math>Gd_5(Si,Ge)_4</math></i>       | 50-350   |
| <i>Manganitas de Lantano</i>                       | 150-350  |
| <i>Aleaciones de Heusler</i>                       | 200-350  |
| <i>Aleaciones <math>Mn(Fe,Co,Ni)(Si,Ge)</math></i> | 150-380  |
| <i>Aleaciones MnAs</i>                             | 260-340  |
| <i>Aleaciones <math>MnFe(P, As)</math></i>         | 250-320  |

Tabla 3. Algunas familias de materiales con efecto magnetocalórico con su respectivo intervalo de temperatura donde se presenta la temperatura de transición entre estados magnéticos

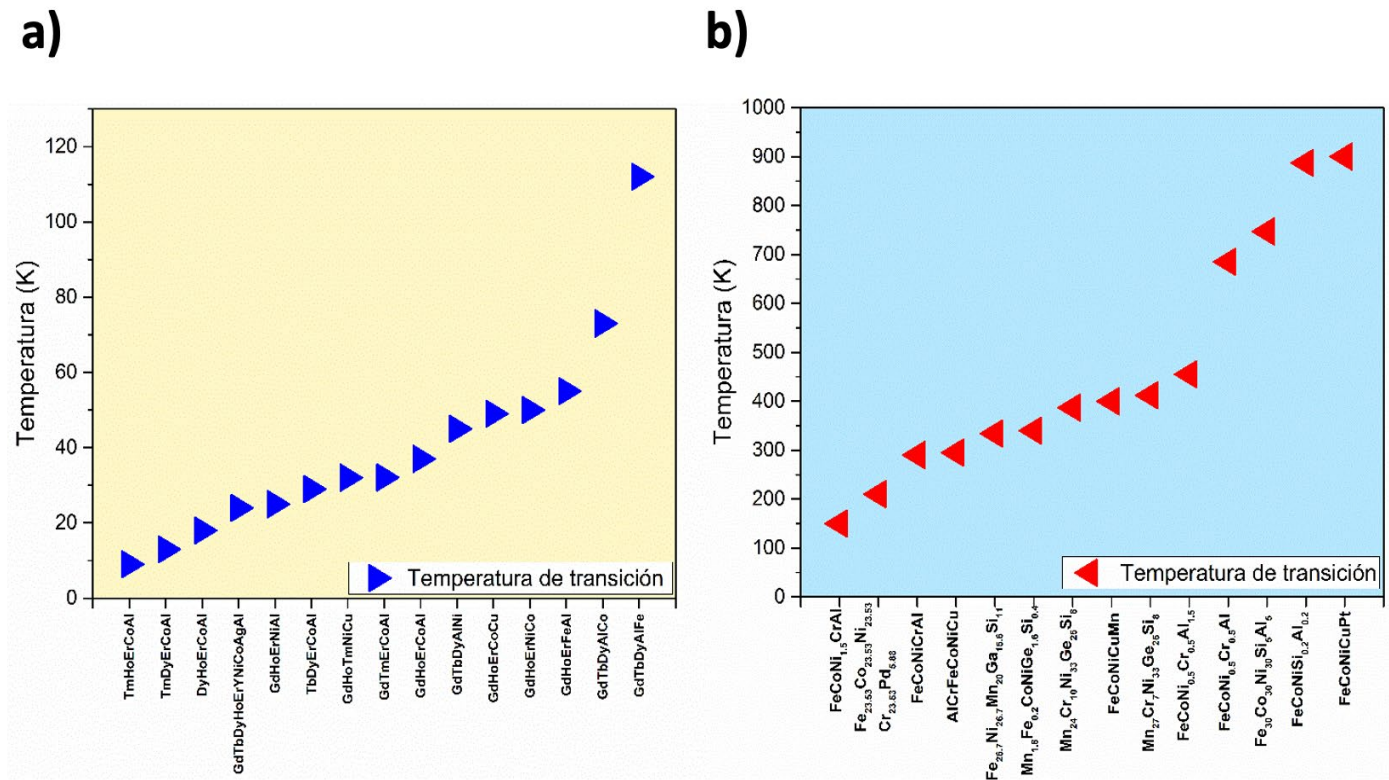


Figura 2. Propiedades magnetocalóricas de diversas HEAs. 2a. Temperatura de transición entre estados de ordenamiento magnético para aleaciones basadas en tierras raras 2b. Temperatura de transición entre estados de ordenamiento magnético para aleaciones basadas en elementos metálicos diversos [13,14,23-24]

## Por lo tanto...

Como cualquier otro material a estudiar, puede decirse que las aleaciones de alta entropía tienen una serie de ventajas y desventajas respecto a las aleaciones convencionales, las cuales se detallan a continuación:

### Ventajas:

- I. Propiedades únicas y mejoradas: Poseen propiedades mecánicas mejoradas en comparación con las aleaciones convencionales, tales como mayor resistencia, dureza, ductilidad y resistencia a la corrosión. De igual manera, presentan mejoras en las propiedades físicas, térmicas y magnéticas.
- II. Combinaciones ilimitadas: Como resultado de la amplia gama de elementos en la tabla periódica, es posible idear amplias series de combinaciones de HEAs, lo que permite ajustar las propiedades a las necesidades específicas de las posibles aplicaciones.
- III. Estructura cristalina compleja: Se ha demostrado que este tipo de sistemas (HEAs) poseen estructuras altamente complejas, como consecuencia del alto número de elementos involucrados. Esto permite fabricarlas con propiedades únicas.
- IV. Elementos menos tóxicos: Ciertas aleaciones de alta entropía no contienen elementos tóxicos o de difícil extracción, lo que reduce su impacto ambiental.

### Desventajas:

- I. Costo: Los procesos de fabricación de este tipo de aleaciones pueden ser complejos, lo que se puede traducir en mayores costos que el de las aleaciones convencionales.
- II. Dificultad en la fabricación: Al tener procesos más complejos, puede dificultarse la producción de este tipo de aleaciones a nivel industrial.
- III. Falta de estudio en sus propiedades: Aunque se han descubierto y determinado

varias de las propiedades únicas en estas aleaciones, aún falta un mayor estudio de los comportamientos físicos, químicos y mecánicos que llegan a presentar.

IV. Menor disponibilidad: Dado que las HEAs son una línea de investigación relativamente nueva, hoy en día no existe una demanda comercial.

## Recapitulando...

El desarrollo de nuevas aleaciones, como lo son las de alta entropía que presentan propiedades únicas y mejoradas, es indicativo del continuo progreso tecnológico. Estas se presentan como una variedad de materiales emergentes que la sociedad demanda. Si bien es cierto que aún existen varios aspectos que se desconocen sobre este tipo de aleaciones, se ha demostrado que poseen propiedades mejoradas en comparación con las aleaciones convencionales, y se proyectan en una amplia gama de aplicaciones potenciales. Dicho esto, las aleaciones de alta entropía representan el futuro en el avance de la metalurgia como una consecuencia natural en la continua búsqueda de sistemas cada vez más complejos y con mayor versatilidad. No obstante, se debe continuar investigando este tipo de materiales para comprender mejor sus propiedades y así definir de manera efectiva y eficiente los campos de aplicación.

## Referencias

- [1]. J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin et al., "Nanostructured High-Entropy Alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes". *Adv. Eng. Mater.* 6 (2004): 299-303. doi:10.1002/adem.200300567
- [2]. B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent. "Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys". *Materials Science and Engineering A* 375-377 (2004) 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107461>
- [3]. Hsuan-Ping Chou, Yee-Shyi Chang, Swe-Kai Chen, Jien-Wei Yeh. "Microstructure, thermophysical and electrical properties in  $Al_xCoCrFeNi$  ( $0 \leq x \leq 2$ ) high-entropy



- alloys". *Materials Science and Engineering B* 163 (2009) 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.05.024>
- [4]. Yih-Farn Kao, Swe-Kai Chen, Ting-Jie Chen, Po-Chou Chu, Jien-Wei Yeh, Su-Jien Lin. "Electrical, magnetic, and Hall properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high-entropy alloys". *J. Alloy. Compd.* 509 (2011) 1607–1614. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.210>
- [5]. F. Kormann, D. Ma, D. D. Belyea, M. S. Lucas, C. W. Miller, B. Grabowski, and M. H. F. Sluiter. "Treasure maps" for magnetic high-entropy-alloys from theory and experiment. *App. Phys. Lett.* 107 (2015) 142404. <https://doi.org/10.1063/1.4932571>
- [6]. Richa Chaudhary et al. "Accelerated and conventional development of magnetic high entropy alloys". *Materials Today*. 49 (2021) 231–252. DOI:10.1016/j.mattod.2021.03.018
- [7]. Qinqin Wei, Guoqiang Luo, Jian Zhang, Pingan Chen, Qiang Shen, Lianmeng Zhang. *J. Materials Science and engineering. A* (2019), 139632.
- [8]. Zhang, Y., Koch, C. C., Ma, S. G., Zhang, H., & Pan, Y. "High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications". Edit. Springer (2016). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27013-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27013-5_5)
- [9]. Z. Wu, H. Bei, G. M. Pharr, E. P. George. "Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures". *Acta Mater.* 81 (2014) 428–441. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026>
- [10]. D. B. Miracle, D.B. "High entropy alloys as a bold step forward in alloy development". *Nat. Comm.* 10 (2019) 1805. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09700-1>
- [11]. R. Wei, H. Sun, Ch. Chen, et al., "Effect of cooling rate on the phase structure and magnetic properties of Fe<sub>26.7</sub>Co<sub>28.5</sub>Ni<sub>28.5</sub>Si<sub>4.6</sub>B<sub>8.7</sub>P<sub>3</sub> high entropy alloy", *J. Magn. Mater.*, 435 (2017): 184–186. doi:10.1016/j.jmmm.2017.04.017
- [12]. W. Muftah, J. Allport, V. Vishnyakov, "Corrosion Performance and mechanical properties of FeCrSiNb amorphous equiatomic HEA thin film", *Surf. Coat. Technol.*, 422 (2021): 127486. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127486.
- [13]. J.Y. Law & V. Franco, "Pushing the limits of magnetocaloric high-entropy alloys", *APL Mater.*, 9 (2021): 080702. doi:10.1063/5.0058388
- [14]. J.Y. Law & V. Franco, "Review on magnetocaloric high-entropy alloys: Design and analysis methods", *J. Mater. Res.*, 38 (2022): 37–51. doi:10.1557/s43578-022-00712-0
- [15]. Y.J. Zhou, Y. Zhang, Y.L. Wang, et al., "Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTix with excellent room-temperature mechanical properties", *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007): 181904. doi:10.1063/1.2734517
- [16]. X.F. Wang, Y. Zhang, G.L. Qiao, et al., "Novel microstructure and properties of multicomponent CoCrCuFeNi-Tix alloys", *Intermetallics*. 15 (2007): 357–362. doi:10.1016/j.intermet.2006.08.005
- [17]. V. Shivam, Y. Shadangi, J. Basu, et al., "Evolution of phases, hardness and magnetic properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy processed by mechanical alloying", *J. Alloy. Compd.*, 832 (2020): 154826. doi:10.1016/j.jallcom.2020.154826
- [18]. S.G. Ma, & Y. Zhang, "Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy", *Mater. Sci. Eng. A*, 532 (2012): 480–486. doi:10.1016/j.msea.2011.10.110
- [19]. P. Moazzen, M.R. Toroghinejad, T. Zargar, et al., "Investigation of hardness, wear and magnetic properties of NiCoCrFeZrx HEA prepared through mechanical alloying and spark plasma sintered", *J. Alloy. Compd.*, 892, (2021): 161924. doi:10.1016/j.jallcom.2021.161924
- [20]. T. Zuo, X. Yang, P.K. Liaw, et al., "Influence of Bridgman solidification on microstructures and magnetic behaviors of a non-equiatomic FeCoNiAlSi high-entropy alloy", *Intermetallics*, 67 (2015): 171–176. doi:10/1016/j.intermet.2015.08.014
- [21]. D. R. Brown, T. B. Stout, J. A. Dirks, et al., "The prospects of alternatives to vapor compression technology for space cooling and food refrigeration applications", *Energy Eng.*, 109 (2012), 7–20. doi:10.1080/01998595.2012.10554226
- [22]. Y. Guo, T. Zhang, Z. Zhang, B. Chen, W. Guo, et al. "Large reversible magnetocaloric effect in high-entropy MnFeCoNiGeSi system with low-hysteresis magnetos-structural transformation." *APL Materials* (2022), 10(9). <https://doi.org/10.1063/5.0108367>
- [23]. S. Vorobiov, O. Pylypenko, Y. Bereznyak, et al. "Magnetic properties, magneto-resistive, and magnetocaloric effects of AlCrFeCoNiCu thin-film high-entropy alloys prepared by the co-evaporation technique". *App. Phys. A* (2021), 127, 179. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04145-6>
- [24]. A. Perrin, M. Sorescu, M.-T. Burton et al. "The Role of Compositional Tuning of the Distributed Exchange on Magnetocaloric Properties of High-Entropy Alloys. *JOM* 69, 2125–2129 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2523-3>



# Los materiales cerámicos: definición, clasificación y breve descripción de su estructura y propiedades

Lorena G. Cuéllar-Herrera<sup>1</sup>, José Antonio Raya-Colín<sup>1</sup>, C. Carrera-Figueiras<sup>2</sup>, José Ortiz-Landeros<sup>1</sup>

1. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, UPALM-Zacatenco, Avenida IPN S/N, Ciudad de México, CP. 07738, México

2. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Campus de Ciencias Exactas e Ingenierías, Periférico Norte, Km. 33.5, Tablaje Catastral 13615, Col. Chuburná de Hidalgo Inn, 97203, Mérida, Yucatán, México  
S/N, Ciudad de México, CP. 07738, México  
[jortizla@ipn.mx](mailto:jortizla@ipn.mx)

## Resumen

Actualmente se tiene a disposición una gran variedad de materiales, muchos de los cuales empleamos para resolver las diversas necesidades del quehacer cotidiano. Usamos materiales tan comúnmente que, de manera empírica, hemos aprendido a identificar algunas de las propiedades generales que los caracterizan; así, se sabe que los llamados cerámicos son aislantes eléctricos y térmicos, son frágiles y muy duros. Sin embargo, probablemente no nos hemos detenido a cuestionar más a detalle sobre otros aspectos de estos materiales, tales como su origen, su composición o bien su trascendencia en el desarrollo de diversas tecnologías. Al ocurrir esto, pudiera no percibirse la amplia gama de materia-

les cerámicos que hoy en día existen y que se usan de manera intensiva en aplicaciones que van más allá de las tradicionales.

Este artículo tiene por objetivo ofrecer al lector no especializado en el área de ciencia de materiales una visión general de la presencia e importancia de los cerámicos como materiales tradicionales y de ingeniería, cuyas propiedades únicas permiten aplicaciones diversas, entre las que se incluyen los materiales más modernos diseñados para tecnologías de última generación.

## Palabras clave

Materiales cerámicos; biocerámicos; refractarios; cerámica tradicional; cerámica avanzada

## Introducción

La palabra “cerámico” proviene del griego antiguo κέραμος (kéramos), cuyo significado es “tierra cocida” o “tierra quemada” y hace referencia a las piezas de barro o arcilla [1-5]. Los cerámicos forman parte de la historia de la humanidad, son materiales que han sido utilizados intensivamente por el ser humano de manera ininterrumpida a través de milenios hasta la actualidad. Prueba de lo anterior son los objetos de cerámica hallados en los vestigios arqueológicos alrededor de todo el mundo y que son probablemente las muestras más antiguas de utensilios y piezas ornamentales que han prevalecido a través del tiempo.

La historia de los cerámicos tiene, presumiblemente, su inicio en la época del Neolítico tardío, al tiempo en que las poblaciones nómadas de cazadores y recolectores se convirtieron en sociedades agrarias, hace unos 12 000 años [5]. Los humanos debieron observar que el material arcilloso mezclado con agua era moldeable y que, además, poseía la capacidad de endurecerse por acción del fuego; propiedades que fueron aprovechadas para fabricar recipientes para el almacenamiento de alimentos y contenedores de líquidos.

En la actualidad, los materiales cerámicos forman parte muy importante de los materiales ingenieriles y sus aplicaciones van desde las más tradicionales, tales como loza de cocina, los recubrimientos de piso o los cementos para construcción, hasta cerámicos avanzados usados en la industria electrónica, aeronáutica y en aplicaciones biomédicas [3-4].

Las propiedades que caracterizan a los materiales cerámicos se relacionan con

su composición y estructura, así como su química de defectos. Por lo anterior, los cerámicos son en su mayoría sólidos cristalinos químicamente inertes, duros, frágiles y estables a altas temperaturas. Además, los especialistas en química y ciencia de materiales pueden sintetizarlos *ad hoc* para promover otras propiedades específicas como son su conductividad iónica, electrónica, propiedades magnéticas y ópticas entre muchas otras. En la figura 1 se presenta una breve descripción sobre la evolución de los cerámicos a través de la historia. Los avances en las distintas subclases de los cerámicos han sido paralelos al desarrollo de las nuevas tecnologías; por ejemplo, en los últimos años, ha surgido gran interés en el diseño de nuevos materiales cerámicos que presentan propiedades eléctricas; estos materiales se denominan electrocerámicos y actualmente se estudian intensivamente para su aplicación en dispositivos de generación y almacenamiento de energía como son el caso de las celdas fotovoltaicas, supercondensadores y baterías [4-5,7].

El presente texto aborda brevemente la definición, clasificación y descripción de la interrelación entre la estructura y propiedades de los cerámicos. Además, está dirigido a lectores no especializados en el tema con el fin de contextualizar la presencia de los cerámicos como materiales de uso cotidiano, ingenieril y su importancia en el desarrollo de tecnologías avanzadas.

## Definición y clasificación de los cerámicos

Los materiales son toda sustancia, ya sea de origen natural o sintético (producido por el ser humano) con propiedades tales que permiten su procesamiento y aplicación para la fabricación de objetos o componentes que



abundantes en la corteza terrestre. Por su parte, los cerámicos avanzados presentan composiciones químicas más complejas y son obtenidos por rutas de síntesis y procesamiento especializadas. En este grupo de materiales se encuentran los semiconductores, superconductores y biocerámicos (cerámicos de uso médico) por mencionar solo algunos [4, 7- 10].

Por definición, los cerámicos son compuestos químicos inorgánicos que en su composición combinan elementos metálicos y no metálicos, y de manera general se pueden incluir a los óxidos metálicos, nitruros, boruros y carburos. Otra posible clasificación para los cerámicos es según sus propiedades y aplicación, como se explica a continuación.

**Cerámicos estructurales:** son materiales obtenidos a partir de polvos refinados o sintéticos y mediante rutas de procesamiento que permiten el control de sus características microestructurales. Se usan en aplicaciones que demandan un desempeño superior, al estar sometidos a esfuerzos mecánicos, abrasión, condiciones extremas de temperatura o ambientes químicos agresivos. Por ejemplo, componentes en turbinas de aeronaves, rodamientos, implantes dentales, intercambiadores de calor o componentes de blindaje [6]. En la figura 3 se muestran pequeñas esferas de zirconia ( $ZrO_2$ ) que, por sus propiedades de dureza y resistencia a la abrasión, son usadas como medio de molienda para realizar procesos de reducción de tamaño de partícula en molinos de laboratorio.

**Cerámicos eléctricos o electrocerámicos:** son materiales con propiedades eléctricas, incluyendo aislantes y dieléctricos, mate-



Figura 3. Esferas de zirconia estabilizada con itrio usadas como medio de molienda

riales magnéticos, ferroeléctricos, piroeléctricos, piezoeléctricos, conductores iónicos y mixtos (iónico-electrónicos), semiconductores, superconductores, termoeléctricos, luminiscentes, etc. Se utilizan en muchas aplicaciones tecnológicas tales como sensores, actuadores, dispositivos ópticos y para el almacenamiento de datos [4, 7, 11]. Los electrocerámicos han contribuido de manera significativa a la miniaturización de los dispositivos electrónicos tales como los teléfonos móviles modernos. Los ahora llamados teléfonos inteligentes funcionan con microprocesadores encapsulados con material cerámico, así como decenas de pequeños condensadores y memoria para almacenamiento de datos hechas con cerámicos. En un celular, el micrófono y bocina pueden contener imanes de ferrita, además de micro vibradores piezoeléctricos. Las antenas cerámicas han sido diseñadas con un alto rendimiento en equipos de comunicación inalámbrica; en un celular permiten la recepción de señal y otras funciones como son el bluetooth y GPS (antenas de tipo resonador dieléctrico) [12]. La pantalla está constituida por el llamado Gorilla Glass de Corning, un material vitrocerámico que posee una resistencia mecánica significativa. Además, en las pantallas podemos encontrar el ITO (Indium Thin Oxide), un material transparente y conductor que permite el funcionamiento de la pantalla táctil [13].

Finalmente, las baterías convencionales de ion litio, con las cuales se logró un importante grado de autonomía de los teléfonos móviles, contienen un cátodo hecho a base de óxidos cerámicos. En la figura 4, se ilustran algunos de los diferentes componentes de un teléfono celular moderno, en los cuales está presente el uso de materiales cerámicos.



Figura 4. Presencia de los materiales cerámicos en los componentes de un teléfono móvil moderno

**Cerámicos refractarios:** Los refractarios son materiales fabricados para aplicaciones que requieren alta temperatura, por ejemplo, en el revestimiento de hornos como aislante térmico o en procesos de manufactura por fundición como medios de filtración de metales fundidos. Algunos ejemplos son la alúmina ( $Al_2O_3$ ), magnesia ( $MgO$ ), carburo de silicio ( $SiC$ ), mullita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), y otros aluminosilicatos de composiciones específicas los cuales ofrecen propiedades superiores en aplicaciones de igual manera específicas [18, 19]. En la figura 5 se muestran algunas espumas cerámicas fabricadas de  $SiC$ , estas piezas

son diseñadas con cierto volumen y tamaño de poros que, aunado a su propiedad de refractariedad, son usadas como medio de filtración de metales fundidos para remover pequeñas impurezas llamadas inclusiones en las piezas metálicas que se fabrican por fundición.



Figura 5. Espumas cerámicas fabricadas con carburo de silicio y usadas como medios de filtración de metales fundidos

**Biocerámicos:** Son cerámicos desarrollados para su uso médico en los seres humanos con fines de sustitución de tejidos óseos, implantes dentales o como material de relleno. Algunos ejemplos de los biomateriales cerámicos son la  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  y las porcelanas dentales (que son óxidos bioinertes, término que hace referencia a que el material es inocuo y no produce ninguna reacción al interactuar con el cuerpo humano). Por su parte, los vidrios porosos, la hidroxiapatita y otros fosfatos de calcio son bioactivos [10, 20-22], es decir, inducen una respuesta biológica específica del organismo, por ejemplo, entre el material y el tejido óseo, fomentando su crecimiento.

**Cerámicos funcionales:** Son materiales avanzados y fabricados “sobre diseño” con características estructurales y microestructurales muy controladas. En esta clasificación pueden también considerarse los estructurales, electrocerámicos, mag-

néticos, refractarios, biocerámicos y todos aquellos diseñados para satisfacer una necesidad específica y que pudieran quedar fuera de los grupos anteriores; por ejemplo, aquellos cerámicos con propiedades térmicas, ópticas o catalíticas.

### Estructura de un material cerámico

Aunque los materiales vítreos pueden clasificarse como materiales cerámicos, en este artículo se enfatizará en los sólidos cristalinos, es decir, sólidos que se caracterizan por presentar una disposición periódica, ordenada y repetitiva de sus átomos o iones, formando una red en tres dimensiones a la cual se le denomina estructura de largo alcance. Los cerámicos presentan enlaces formados por la contribución predominante de enlace iónico y en menor medida de enlace covalente [1, 23].

Las principales propiedades de los materiales cerámicos se relacionan con sus características estructurales; es decir, la combinación de enlaces químicos y su química de defectos. El enlace, ya sea predominantemente iónico o covalente, es fuerte, lo que promueve que los sólidos sean químicamente inertes y a menudo estables a altas temperaturas. La alúmina alfa ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), que es el material cerámico ingenieril por excelencia tiene, por ejemplo, un punto de fusión de 2054 °C. Otro ejemplo es la falta de electrones libres que confiere a los cerámicos una conductividad térmica y electrónica deficiente. Por supuesto, los cerámicos avanzados pueden ser diseñados y procesados de manera tal, que las modificaciones estructurales o microestructurales pueden cambiar significativamente sus propiedades. Así, se pueden obtener mediante la correcta incorporación de cationes dopantes en la estructura, materiales cerámicos

semiconductores y conductores iónicos, o bien, mediante un proceso de densificación adecuado, la obtención de cerámicos transparentes a la luz visible.

Retomando la discusión sobre el arreglo estructural de los cerámicos, si se considera que la distribución de los electrones en los iones metálicos que los constituyen es casi esférica y que el enlace interatómico que exhiben, al surgir de fuerzas coulómbicas, es de naturaleza multidireccional. Entonces, la estructura más estable de un compuesto predominantemente iónico tiende a ser aquella en la que un ion obtiene el máximo número de vecinos inmediatos (número de coordinación) de carga opuesta [1, 4, 23]. Tales estructuras exhiben, por tanto, una densidad de empaquetamiento eficiente de los iones que las constituyen. Con base en lo anterior, una forma simple de describir las estructuras ordenadas de los cerámicos es usando un modelo de esferas rígidas, donde se considera que uno de los elementos se encuentra formando un empaquetamiento compacto, del tipo que presentan los metales y que en los huecos remanentes en dicho empaquetamiento se ubica el otro elemento. En la figura 6 se muestra un modelo de la estructura del óxido de cerio o ceria ( $\text{CeO}_2$ ). Su estructura puede describirse como un empaquetamiento cúbico de los iones Ce que ocupan las posiciones de una red llamada cúbica centrada en las caras. En este arreglo, los iones oxígeno se encuentran rodeados por cuatro iones cerio al estar ubicados en los huecos tetraédricos [1,4]. La estructura antes descrita se denomina de tipo fluorita, haciendo referencia al difluoruro de calcio, con fórmula química  $\text{CaF}_2$ . Otros materiales que poseen una estructura de este tipo son la zirconia cúbica ( $\text{c-ZrO}_2$ ) y la urania ( $\text{UO}_2$ ).

De manera análoga al tratamiento que se ha hecho para el caso de la estructura tipo fluorita, existen otras estructuras tipo que permiten describir el arreglo atómico de cerámicos con diferentes estequiometrías; por ejemplo, el óxido de magnesio (MgO), óxido de calcio (CaO) y óxido de bario (BaO) presentan una estructura tipo sal de roca, la cual hace referencia a estructura de cloruro de sodio o sal común (NaCl). Finalmente, es importante mencionar al lector no familiarizado con el tema que en el modelo de la figura 6a se pueden visualizar ciertos motivos estructurales que son los poliedros de coordinación que resultan del empaquetamiento de átomos (cationes y aniones) de diferente tamaño; se esquematiza el enlazamiento interatómico y líneas que describen la celda unitaria; además, la relación del tamaño entre los átomos de cerio y oxígeno corresponden a sus radios atómicos. Esta forma de descripción resulta muy didáctica para visualizar la distribución de los átomos en el volumen del material. En este sentido, y para fines comparativos, en la figura 6b, se representa el mismo arreglo estructural de la ceria, pero ahora considerando el radio iónico del  $Ce^{4+}$  y  $O^{2-}$ .

### Propiedades y aplicaciones de los cerámicos

En este punto ya se ha mencionado, al menos de manera cualitativa, las principales propiedades que caracterizan a un cerámico y que lo distinguen claramente de los metales y polímeros: altos puntos de fusión, dureza, refractariedad, etc. Ciertamente, la selección de un cerámico para una determinada aplicación se basa en dichas propiedades (ver tabla 1). Aquí es importante mencionar que las propiedades y desempeño de un material bajo

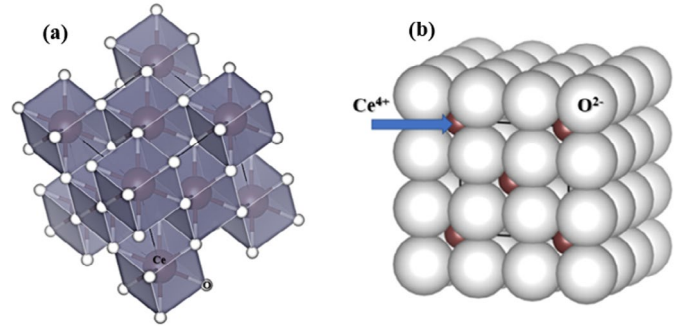


Figura 6. Modelo de la estructura tipo fluorita que presenta el óxido de cerio o ceria

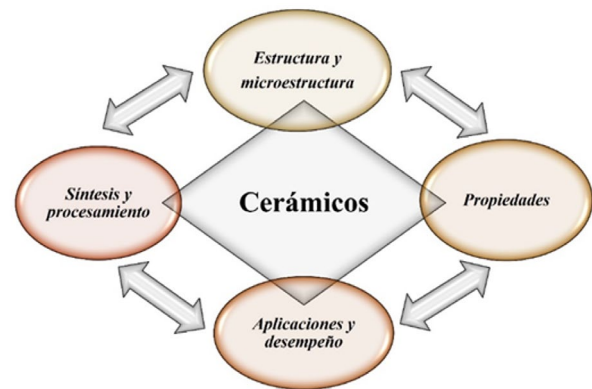


Figura 7. Interrelación entre la estructura, propiedades y desempeño de un material cerámico

condiciones de trabajo específicas se relacionan directamente con su estructura y microestructura, y estas, son a su vez resultado del método de síntesis del material y del procesamiento de la pieza o componente. Es el ingeniero en materiales quien tiene muy en mente esta interrelación (ver figura 7) y quién utiliza diferentes técnicas de síntesis, procesamiento y caracterización para diseñar materiales cerámicos con propiedades optimizadas.

En la tabla 1 se muestran ejemplos de materiales cerámicos agrupados según las clasificaciones previamente mencionadas, además, se mencionan las propiedades específicas que son aprovechadas o bien controladas al sintetizar o procesar cada tipo de material o pieza cerámica para promover su desempeño en aplicaciones específicas.



| Clasificación del material |                         | Ejemplos   | Aplicaciones diversas  | Características o propiedades aprovechables   |
|----------------------------|-------------------------|--|--|---|
| Cerámicos tradicionales    |                         | Arcillas (y otros aluminosilicatos), porcelanas, cerámicos triaxiales.   | Piezas ornamentales, piezas artísticas, loza de cocina, muebles de baño, azulejos, otros recubrimientos, cemento, vidrio y materiales de construcción.   | Materias primas naturales abundantes o refinadas de bajos costos en comparación con los polvos sintéticos.<br><br>Se pueden aplicar métodos convencionales de procesamiento cerámico. |
|                            | <i>Estructurales</i>    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , YSZ, TiN, SiC, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , diamante.   | Abrasivos, recubrimientos duros resistentes al desgaste, herramientas de corte.  | Módulo de Young alto, resistencia a la compresión, alta dureza, resistencia a la abrasión, estabilidad térmica, estabilidad química.  |
| Cerámicos avanzados        | <i>Magnéticos</i>       | γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Mn <sub>0.4</sub> Zn <sub>0.6</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , Y <sub>2.60</sub> Gd <sub>0.34</sub> Fe <sub>4.22</sub> , Al <sub>0.68</sub> Mn <sub>0.09</sub> O <sub>12</sub> , ferritas Ni-Zn, ferritas Mn-Zn.  | Núcleos de inductores y transformadores, imanes permanentes para sistemas de audio (bocinas), sistemas de almacenamiento de datos.   | Capacidad de magnetizarse/desmagnetizarse por influencia de un campo magnético externo aplicado.  |
|                            | <i>Electrocerámicos</i> | BaTiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Pb(Zr <sub>1-x</sub> Ti <sub>x</sub> )O <sub>3</sub> , KNbO <sub>3</sub> , LiNbO <sub>3</sub> , BiFeO <sub>3</sub> , Bi <sub>2</sub> Ru <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , ZrO <sub>2</sub> , óxido de indio y estaño (ITO), SiC, YBaCuO <sub>7</sub> , SnO <sub>2</sub> , α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PbZr <sub>0.5</sub> Ti <sub>0.5</sub> O <sub>3</sub> (PZT), SiO <sub>2</sub> , Ce <sub>0.9</sub> Sm <sub>0.1</sub> O <sub>2</sub> | Dispositivos de almacenamiento de datos, almacenamiento de energía (condensadores y baterías), piezoeléctricos, dieléctricos, varistores, semiconductores, membranas, sensores, superconductores, celdas de combustible. | Conducción electrónica, conducción iónica, constante dieléctrica, piezoelectricidad, ferroelectricidad, luminiscencia, termoluminiscencia.  |
|                            | <i>Refractarios</i>     | Aluminosilicatos, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, MgO, mullita, Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> .   | Ladrillos refractarios, cementos colables refractarios, medios filtrantes para metal fundido.  | Refractariedad, conductividad térmica, expansión térmica, estabilidad térmica, estabilidad química, puntos de fusión altos (>>900 °C), resistencia al choque térmico.                 |
|                            | <i>Biocerámico</i>      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , porcelanas dentales, Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub> .  | Tornillos óseos, prótesis de cadera, implantes dentales, cementos biocerámicos.  | Bioactividad, biocompatibilidad, densidad, compatibilidad mecánica, resistencia a la corrosión.   |
|                            | <i>Funcionales</i>      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , nitruro de aluminio (AlN), vidrio Pyrex, vidrio Corning, zircón (ZrSiO <sub>4</sub> ), sulfuro de cadmio (CdS), hexaboruro de lantano, (LaB <sub>6</sub> ), Pb <sub>1-x</sub> La <sub>x</sub> (Zr <sub>2</sub> Ti <sub>1-2</sub> ) <sub>1-x/4</sub> O <sub>3</sub> (PLZT), Y <sub>3</sub> A <sub>15</sub> O <sub>12</sub>   | Implantes de cadera, Encapsulamiento de circuitos integrados, material de laboratorio, pigmentos, materiales fluorescentes, láser de estado sólido.  | Combinación de propiedades que se requieran para una aplicación en particular; pueden ser eléctricas, térmicas, ópticas, magnéticas, mecánicas, etc.                                  |

Tabla 1. Ejemplos de materiales cerámicos de acuerdo con su clasificación y usos [3,4-7,13-19, 24]

Finalmente, es importante mencionar que la selección de un cerámico para sus aplicaciones antes citadas (tabla 1) o cualquiera de tantos usos que no han sido mencionados aquí, involucra diferentes criterios. Estos pueden ser de costos, abundancia en la naturaleza, facilidad de procesamiento, pero principalmente, las propiedades que les permiten un desempeño bajo condiciones de operación en las que los metales o polímeros no resultan adecuados. En la figura 8 se muestran valores del módulo de elasticidad ( $E$ ) y del punto de fusión ( $T_f$ ) expresados en GPa y  $^{\circ}\text{C}$ , respectivamente [1, 4, 5, 25]. Las diferencias entre los tres tipos de materiales, cerámicos, metales y polímeros, son evidentes. Puede observarse que en el caso de algunos cerámicos denominados de ultra alta temperatura, como los son los carburos metálicos, los puntos de fusión pueden llegar a superar los  $3000^{\circ}\text{C}$  [6], mientras que para el caso de los polímeros las temperaturas de fusión no rebasan los  $300^{\circ}\text{C}$ . Eso quiere decir que se tiene una diferencia de un orden de magnitud en esta propiedad. Otra diferencia está en los valores del módulo de elasticidad entre cerámicos (200-400 GPa) y metales (40-200 GPa). Ciertamente, los datos usados para la construcción de la gráfica (figura 8) sirven para contrastar las diferencias entre las propiedades de los materiales y no se trata de sugerir que para uno u otro caso pueda utilizarse algún adjetivo de “mejor o peor material”, de hecho, en la ciencia y tecnología de los materiales sería inconveniente e incluso ambiguo hacerlo. Lo que se tiene es una amplia gama de materiales con diversas posibilidades para ser aplicados en la resolución de problemas específicos. Ahora se tiene idea de que, en este contexto, los cerámicos tienen aún mucho por ofrecer.

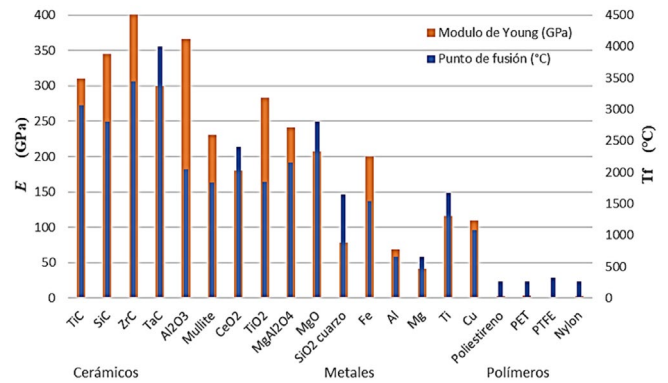


Figura 8. Valores del módulo de elasticidad ( $E$ ) y del punto de fusión ( $T_f$ ) de diferentes materiales

## Conclusiones

El ser humano ha recorrido un largo camino en el estudio y aplicación de los cerámicos. Son materiales que se han utilizado prácticamente desde el origen de las civilizaciones, en un inicio, para la fabricación de utensilios que le permitieron cubrir necesidades básicas de su vida cotidiana. Actualmente, los desarrollos tecnológicos que involucran el uso de estos materiales incluyen avances tales como la fabricación de dispositivos electrónicos portátiles que permiten las telecomunicaciones, la geolocalización y el almacenamiento masivo de datos de todo tipo. Por ejemplo, sentados en la comodidad de los hogares pueden verse en tiempo real eventos que toman lugar alrededor de todo el mundo o hablar con personas de lugares lejanos. Todo esto ha sido posible gracias a los avances en el campo de los materiales en electrónica, en donde por supuesto se incluyen a los cerámicos. Aunque en un texto tan breve como este es imposible profundizar en mayores detalles sobre sus características y propiedades, es importante identificar su presencia y aporte al modo de vida actual. Los materiales cerámicos se mantienen vigentes y ciertamente su estudio y perfeccionamiento ayudará a resolver proble-

mas emergentes que hoy en día enfrenta la humanidad, como los relacionados con la energía y el medioambiente.

## Agradecimientos.

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) su apoyo mediante los programas SIP-IPN Proyecto No. 20230451, PIAS-IPN, EDI-IPN, BEIFI-IPN y SIBE-IPN. De igual manera se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, otorgado mediante el programa SNI-CONAHCYT.

## Referencias

- [1] W. D. Kingery H. K. Bowen, Donald R. Uhlmann. Introduction to Ceramics, 2nd Edition, Wiley, USA, 1976.
- [2] R. E. Hummel. Understanding Materials Science: History, properties and applications, 2nd Edition, Springer, USA, 2004.
- [3] D. W. Richerson. The magic of ceramics, 2nd Edition, Wiley, USA, 2012.
- [4] C. B. Carter, M. G. Norton. Ceramic Materials: Science and Engineering, 2nd Edition Springer, USA, 2013.
- [5] R. B. Heimann, M. Maggetti. Ancient and Historical Ceramics: Materials, Technology, Art, and Culinary Traditions, Schweizerbart Science Publishers, Germany, 2014.
- [6] B. Basu, K. Balani. Advanced Structural Ceramics, Wiley, USA, 2011.
- [7] S. K. Ramasesha. "Science and Technology of Ceramics - Advanced Ceramics: 3. Structural Ceramics and Glasses" Resonance: Journal of Science Education, 5 [2] (2000) 4-11.
- [8] Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright. The Science and Engineering of Materials, 7th Edition Cengage Learning, 2016.
- [9] S. K. Ramasesha. "Science and Technology of Ceramics: 1. Traditional Ceramics" Resonance: Journal of Science Education, 4, [8] (1999) 16-24.
- [10] Y. Silva, S. Delvasto. "Características físicas y mecánicas de porcelanas dentales feldespáticas empleando hueso bovino como reemplazo del feldespato" Rev. LatinAm. Metal. Mat. 36 [1] (2016) 61-69.
- [11] S. Banerjee, A.K. Tyagi. Functional Materials: Preparation, Processing and Applications, Elsevier, Ámsterdam, Países Bajos, 2012.
- [12] By Dr. Liji Thomas, Ceramics in Cell Phones, Azom (2019) <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15780>
- [13] B. Rohrig. "Smartphones: Smart Chemistry" Chem-Matters April (2015)10-12.
- [14] S. B. Narang, K. Pubby. "Nickel Spinel Ferrites: A review" Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 519 (2021) 167163.
- [15] A. Vedrtam, K. Kalauni, S. Dubey, A. Kumar. "A comprehensive study on structure, properties, synthesis and characterization of ferrites" AIMS Materials Science, 7 [6] (2020) 800-835.
- [16] N. Kumari, S. Kour, G. Singh, R. K. Sharma. "A brief review on synthesis, properties and applications of ferrites" AIP Conference Proceedings 2220 [1] (2020) 020164.
- [17] S. Arcaro, J. Venturini. Modern Ferrites in Engineering: Synthesis, Processing and Cutting-Edge Applications. Springer, USA (2021).
- [18] C. Sadika, O. Moudden, A. El Bouari, Iz-Eddine El Amrani. "Review on the elaboration and characterization of ceramics refractories based on magnesite and dolomite" Journal of Asian Ceramic Societies 4 (2016) 219-233.
- [19] A. O. Surendranathan. An Introduction to Ceramics and Refractories, CRC Press, USA, 2020.
- [20] L. Sedel "Evolution of Alumina-on-Alumina Implants" Clinical Orthopaedics and Related Research, 379 (2000) 48-54.
- [21] J. Fernández-Monjes, B. M. Maresca, C. Bregni, "Bioce-rámicos: aspectos fármaco-tecnológicos y clínicos de uso odontológico" Revista del Ateneo Argentino de Odontología, LXII [1] (2020)31-38.
- [22] F. Orgaz, J. Rincón, F. Capel. "Materiales biocerámicos y biovidrios" Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr. 26 [1] (1987) 13-19.
- [23] R. J. D. Tilley. Understanding solids: the science of materials. John Wiley & Sons, USA, 2004.
- [24] V. Ruiz-Santoyo, B. A. Andrade-Espinoza, R. Romero-Toledo, L. M. Anaya-Esparza, Z. Villagrán, A. Guerra-Contreras. "Use of Nanostructured Photocatalysts for Dye Degradation: A Review" Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 66[3] (2022) 367-393.
- [25] C. A. Harper. Handbook of ceramics, glasses and diamonds, McGRAW-HILL, USA, 2001.
- [26] J. Binner, M. Porter, B. Baker. "Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs-A review" Int. Mater. Rev. 65 (2020) 389-444.



# Salud mental diversa: Estudio de caso de una persona trans adulta mayor con antecedentes suicidas

**Joel Alejandro Hernández Rico**

Posgrado en Psicología de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza  
Av. Guelatao 66, Ejército de Oriente, Iztapalapa, 09230 Ciudad de México, CDMX Asociación  
civil DiVU: Diversidad, cultura, género, alimentación y ciencia  
[hernandezricbd@gmail.com](mailto:hernandezricbd@gmail.com)

## Introducción

En una encuesta realizada por el Consejo Nacional para Prevenir la Discriminación (CONAPRED, 2017) se muestra que, en México, siete de cada diez personas con una “identidad de género no normativa” experimentaron algún tipo de discriminación. Alarmantemente, se reporta que más de siete de cada diez personas con identidades de género no normativas expresan el deseo de no vivir más, lo cual coincide con estadísticas internacionales para personas dentro del espectro trans que no reciben atención psicoterapéutica oportuna (Tordoff et al., 2022).

De ahí la gran importancia que debe tener el acompañamiento psicológico para la población trans como parte del enfoque general de salud que, en la actualidad, es denominado “atención para la afirmación de género” (gender-affirming care) cuyo objetivo es que la población trans tenga

la mejor calidad de salud posible (Coleman et al., 2022). Como profesionistas de la salud mental, debemos reconocer las manifestaciones de la ideación suicida en esta población y mantener la praxis ética orientada a la salud de la persona consultante. Para esto es indispensable reconocer nuestras limitaciones y también prejuicios personales, evitando a toda costa alterar la ecología del sistema de vivencias del paciente.

La falta de atención adecuada (y no solo en el ámbito de la salud mental) para las poblaciones vulnerables, tales como lo son la comunidad trans (binaria y no binaria), se ponen en evidencia con la falta de capacitación y empatía del personal de salud y un desconocimiento de la información científica reciente disponible en este tema, la cual se mantiene en constante actualización respecto del área (Serano, 2023).

## Expresión de género

Es pertinente conocer las aportaciones de la Teoría Multifactorial de la Identidad de Género. En este modelo, diversos autores hablan de la complejidad al momento de construir el género y se observa una gran influencia de los estereotipos en la expresión de género (la expresión y la identidad de género son dos conceptos distintos). También, se menciona que las personas que coinciden (en mayor medida) con el sexo asignado al nacer y con su rol social tienden a mostrar esquemas sociales mayoritariamente rígidos (Sánchez, 2009).

La práctica psiquiátrica y psicológica (que pertenecen a la clínica moderna) reconocen, desde hace varias décadas, que la expresión de género y su desarrollo no se limitan a factores biológicos o patologizantes. Se sabe que esta expresión se presenta “diversa” ante la sociedad y que puede tener múltiples variaciones y expresiones, mismas que cambian temporalmente (tanto en un mismo individuo como en poblaciones enteras) y culturalmente, a lo largo de la vasta historia humana (Roselli, 2018).

Desde hace prácticamente medio siglo, nos ha quedado muy claro a los profesionales de la salud mental que las orientaciones de la diversidad sexual no representan ninguna patología mental. La expresión sexual, decidida o creada por una persona, no conlleva a cuadros depresivos, sino el prejuicio social de la expresión de género y orientación sexual. Lo anterior puede manifestarse en problemas tales como ansiedad, depresión, ideación e intentos de suicidio, principalmente en las poblaciones con identidad de género que no entran dentro de las polaridades establecidas por la sociedad (Olson et al., 2016).



## Transgénero-transexualidad

Anacrónicas ideologías moralistas suelen entorpecer la adecuada atención médica de personas trans. Estas detractoras propuestas anticientíficas tienen limitaciones epistemológicas, además de vincular de manera inadecuada las propuestas psicológicas y neurológicas, como lo mencionan López y Callejas (2016) al señalar que el reduccionismo biologicista conlleva a la patologización de las poblaciones vulnerables.

Otro factor importante a tomar en cuenta para la atención psicológica de personas trans es su interacción social, pues se ha observado que intentos de solución que excluyen esta variable pueden mantener el problema establecido, tal como lo fundamentan los enfoques en Terapia Breve Familiar. Sendos intentos de solución suelen mantener dicho problema, haciendo que las buenas intenciones en realidad agudicen el proceso del síntoma (Ray & Watzlawick, 2006).

Una vez más, la evidencia empírica muestra que la búsqueda de la “normalización” (así como aquellas intervenciones psicológicas limitadas a la “corrección” de aquellas conductas no hegemónicas) han resultado en persistentes problemáticas que limitan el adecuado desarrollo y atentan contra la salud mental de nuestros pacientes (Boc-

king et al., 2016). Es importante resaltar la importancia del contexto donde se desarrollaron las sesiones de la consultante de quien hago la presentación del caso, la Ciudad de Nezahualcóyotl. Esta zona conurbada de la periferia, pese a presentar diversos programas que apoyan a las mujeres y buscan la reducción de violencia de género, tiene complejidades y problemas muy arraigados. Mi consultante menciona cómo ella misma vivió momentos de acoso y violencia de género en las inmediaciones de la zona.

Es necesario continuar trabajando con la sensibilización de estas comunidades en temas de diversidad y expresión de género ya que, al tratarse de una comunidad diversa que está compuesta en su mayoría por inmigrantes de otros estados, diversas ideologías de género que tienden a acentuar el machismo y la misoginia suelen converger de un tiempo a otro.

Entre las diversas estrategias que he aplicado en mis años de práctica clínica atendiendo personas de la diversidad sexual, puedo reportar que he tenido resultados satisfactorios al pasar de la palabra “transexual” a “transgénero” como una medida de autocuidado y reconocimiento de las personas que transicionan. Esto como una medida temporal para evitar la patologización y el reduccionismo biológico (reconociendo que ambos términos pueden variar en su definición según la trayectoria de vida de cada persona).

### Presentación del caso

Paciente que se identifica como femenina de 67 años de edad procedente del Estado de México, zona oriente. Ella comenzó su transición hace 7 años y sufre de epilepsia



postraumática tras un intento de suicidio hace 37 años, tras saltar premeditadamente de un caballo en pleno galope.

La paciente presenta ligeras alteraciones de tiempo y espacio, llegando a confundir (en algunas ocasiones) al personal clínico que la atiende. Esto parece no afectar su funcionalidad cotidiana. Actualmente, se encuentra casada con su segunda esposa, con quien no tuvo hijos biológicos. Acude al Instituto de la Mujer Nezahualcóyotl para recibir atención psicológica, mismo lugar en donde yo realicé la intervención clínica que ahora describo, asesorado en todo momento por el programa de posgrado en psicología de la UNAM que curso y los especialistas tratantes de este centro integral que ofrece servicios de salud mental.

Ella refiere sentirse deprimida durante la semana y “sin ganas de hacer cosas”. También dice que “no se siente bien con su pareja actual”, quien le reprocha en diversos momentos el porqué tomó la decisión de realizar su transición de género de hombre a mujer. Por otro lado, menciona que le es difícil poder estar con las demás personas, ya que según ella “no es tan agraciada como otras mujeres”.

El tratamiento psicológico aplicado fue la Terapia Familiar Centrada en el Problema, el cual es un modelo de terapia que históricamente surgió de las investigaciones realizadas por el Brief Therapy Center, en Palo Alto. Este modelo interviene a nivel interaccional en la vida del consultante, por lo que sus premisas de acción se basan en no normativizar y no patologizar, tanto las conductas como al propio usuario consultante (Vargas, 2007). Teniendo en cuenta las ventajas de este modelo, se buscó definir el problema que llevó a la consultante a sesión. Ella menciona que busca lograr conciliar una imagen más femenina en su persona. Acude conmigo a terapia psicológica una vez a la semana, en un periodo total de doce sesiones.

Para lograr el objetivo de la paciente y disminuir su queja, se contó con estrategias para reencuadrar la definición, los estereotipos y los roles impuestos por la sociedad con respecto a la feminidad. Se buscó ampliar su horizonte de posibilidades en torno a su expresión de género, resaltando en su persona aquellas actividades que le hicieran sentir “más femenina” en su actuar cotidiano.

Dentro de las estrategias implementadas para reforzar estas ideas se logró afianzar una red de apoyo dentro de su comunidad, con el fin de hacer más factible su integración. Esto se logró en parte gracias al trabajo previo realizado en nuestro centro. Se la integró a diversos cursos y talleres ofrecidos en las instalaciones, y por la parte terapéutica se logró identificar posibles agentes de cambio dentro de su propia comunidad como, por ejemplo, la estilista de su colonia o una de sus hermanas.

Fortalecer los vínculos y el apoyo de su familia fue de vital importancia para el caso, puesto que para ella facilitó la interiorización de la diversidad de los roles femeninos en nuestra sociedad. A través de la interacción con los integrantes de su familia, comunidad y las instituciones dispuestas a integrarla a la comunidad, puede reforzarse la construcción de su expresión sexual y de género, y con esto ella puede resignificar su feminidad.

Al finalizar las sesiones ella reportó una disminución de las agresiones de pareja. Se fortaleció la convivencia y se motivó el respeto a sus nuevas expresiones de feminidad. Lo anterior reemplazó aquellos hirientes discursos de superioridad y clasismo previamente reportados por su pareja (Por ejemplo: “deberías leer y ser más agraciada como una buena mujer”). De igual manera, se abrió un abanico de nuevas oportunidades de interacción en círculos como los ya mencionados talleres y actividades culturales, que ofrece el mismo Instituto de la Mujer Nezahualcóyotl, donde recibió esta consulta. Las nuevas redes de apoyo generadas disminuyeron significativamente la sensación de depresión y tristeza de la paciente.

### **Objetivos posteriores a las sesiones**

Para los próximos objetivos de trabajo con la paciente se hace énfasis en trabajar aquellas relaciones familiares con los hijos, así como acrecentar las relaciones con otras personas transgénero (en grupos de pares, por ejemplo).

### **Discusión**

Dentro de la atención a la comunidad trans pueden observarse diversas limitaciones, una de ellas es la manera en la cual se dis-

pone de atención profesional e integral a este grupo socialmente vulnerado. Son pocos los profesionales capacitados bajo modelos o esquemas integrativos, que además cuentan con bases científicas y que se encuentran dispuestos a brindar una mejor atención a la población trans de nuestro país, a pesar de que existen protocolos al respecto adecuados al contexto nacional (Secretaría de Salud, 2020).

El reduccionismo biológico y las posturas moralistas no hacen más que acentuar la dificultad de acceso a tratamientos adecuados y el seguimiento de nuestros pacientes. Esto también tiene enormes limitaciones para poder explorar la expresión sexual del individuo, como fue el caso de mi paciente, quien a sus 67 años continuaba construyendo su sexualidad (como respuesta a un contexto que consideraba a su situación como “una enfermedad”). Dentro de las sesiones, ella llegó a compartir lo feliz que se sentía de que los jóvenes de ahora sean capaces de expresar su sexualidad con libertad y lo triste que era para ella verse envejecer y por no haber tenido “el valor” de salir del clóset antes.

Lo anterior generó diversas iatrogenias en el desarrollo de su sexualidad, al no ser orientada profesionalmente. Entre los daños se encuentran aquellos arraigados en estereotipos de género, la idealización de la figura femenina, violencia intrafamiliar, así como dificultades para poder recibir una adecuada atención médica (terapia de reemplazo hormonal).

El caso clínico que ahora presento es excepcional, pero para nada es el único. Si bien es cierto que la población adulta mayor (y con una vida ya establecida) que transiciona es

poco visibilizada, es una población existente e importante, y diversas asociaciones y refugios LGBTI+ del país pueden dar cuenta de ello. Debemos ser empáticos, receptivos y compartir el conocimiento generado para futuras intervenciones de casos similares.

Algunos elementos claves de la atención fueron aumentar el diálogo de la paciente con su familia (con el fin de brindar apoyo para esta nueva etapa de su vida) y, a nivel institucional, se recomienda a los centros de salud brindar espacios para el reconocimiento, así como actividades que faciliten la transición y descubrimiento del rol social de las personas trans. Por último, pero no menos importante, se invita a la capacitación constante del personal de la salud en todos los niveles de atención. El COPRED, CONAPRED, asociaciones civiles y centros de investigación y enseñanza ofrecen cursos gratuitos (libres de estigmas y prejuicios) basados en la más reciente evidencia científica en torno a la correcta atención de personas trans.

Para concluir, debo mencionar que ha sido un reto profesional acompañar a esta paciente, incluso con los años de experiencia





clínica que llevo acompañando personas de todas las identidades LGBTI+ y el extenso trabajo de activismo social que complementa mi formación profesional. Me enfrenté a adaptaciones del centro de trabajo donde laboro y fue necesario continuar instruyendo al supervisor en terapia de mi turno (en torno a las adecuaciones pertinentes para brindar un enfoque de género durante la terapia, así como hacer notar algunas ideologías que podrían sostener los síntomas presentados por la consultante).

Este reto se acentuó al momento de buscar referencias bibliográficas, guías clínicas y estrategias fuera del estándar establecido, así como ampliar la visión del personal supervisor y burocrático de los institutos para que me permitieran realizar intervenciones alejadas de visiones reduccionistas del género. Hago una atenta invitación a la comunidad y profesionistas de la salud a capacitarse y sensibilizarse en el tema, con el objetivo de llevar a cabo un ejercicio profesional íntegro, ético, objetivo, con vocación al servicio en perspectiva de género y derechos humanos.

## Agradecimientos

Este trabajo pudo realizarse gracias al apoyo económico brindado por CONACYT en la Maestría en psicología, con residencia en Terapia Familiar, así como la institución que me albergó para realizar la estancia clínica y de investigación, el Instituto de la Mujer del Municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México. Agradezco las precisiones técnicas y enorme trabajo de edición de los activistas sociales LGBTI+ y defensores de derechos humanos Luis Fernando Patlan Velázquez y Astron Rigel Martínez Rosas, así como la revisión ortotipográfica de su servicio social en DiVU, Gibran de la Cruz

Mirón. Agradezco la cooperación y compañía de mi paciente, M. V., quien acudió con mucho entusiasmo y colaboración a todo el proceso.

## Bibliografía

1. Bockting, W., Coleman, E., Deutsch, M. B., Guillamon, A., Meyer, I., Meyer, W., Reisner, S., Sevelius, J., & Ettner, R. (2016). Adult development and quality of life of transgender and gender nonconforming people. *Current Opinion in Endocrinology, Diabetes & Obesity*, 23(2), 188–197. <https://doi.org/10.1097/med.0000000000000232>
2. Coleman, E., Radix, A. E., Bouman, W. P., Brown, G. R., de Vries, A. L., Deutsch, M. B., Ettner, R., Fraser, L., Goodman, M., Green, J., Hancock, A. B., Johnson, T. W., Karasic, D. H., Knudson, G. A., Leibowitz, S. F., Meyer-Bahlburg, H. F., Monstrey, S. J., Motmans, J., Nahata, L., ... Arcelus, J. (2022). Standards of care for the health of transgender and gender diverse people, version 8. *International Journal of Transgender Health*, 23(sup1). <https://doi.org/10.1080/26895269.2022.2100644>
3. Consejo Nacional para Prevenir La Discriminación [CONAPRED], (2018). Encuesta Nacional de Discriminación 2017: Prontuario de Resultados.
4. López Moratalla, N., Calleja Canelas, A. (2016). Transexualidad: Una alteración cerebral que comienza a conocerse. *Cuadernos de Bioética*, XXVII(1), 81-91.
5. Olson, K. R., Durwood, L., DeMeules, M., & McLaughlin, K. A. (2016). Mental health of transgender children who are supported in their identities. *Pediatrics*, 137(3). <https://doi.org/10.1542/peds.2015-3223>
6. Ray, W. y Watzlawick P. (2006). El Enfoque Interaccional. En A. Roizblatt (Ed.) *Terapia Familiar y de Pareja*. (pp.191-208).
7. Rocha Sánchez, T. E., (2009). Desarrollo de la Identidad de Género desde una Perspectiva Psico-Socio-Cultural: Un Recorrido Conceptual. *Revista Interamericana de Psicología/ Interamerican Journal of Psychology*, 43(2), 250-259.
8. Roselli, C. E. (2018). Neurobiology of gender identity and sexual orientation. *Journal of Neuroendocrinology*, 30(7). <https://doi.org/10.1111/jne.12562>
9. Secretaría de Salud (2020) Protocolo para el Acceso sin Discriminación a la Prestación de Servicios de Atención Médica de las personas LGBTTTI. Disponible en <https://www.gob.mx/insalud/documentos/protocolo-comunidad-lgbtti>
10. Serano, J. (2023, May 16). Gender-affirming care for trans youth is neither new nor experimental: A timeline and compilation... Medium. <https://juliaserano.medium.com/gender-affirming-care-for-trans-youth-is-neither-new-nor-experimental-a-timeline-and-compilation-b4bb8375d797>
11. Tordoff, D. M., Wanta, J. W., Collin, A., Stepney, C., Inwards-Breland, D. J., & Ahrens, K. (2022). Mental health outcomes in transgender and nonbinary youths receiving gender-affirming care. *JAMA Network Open*, 5(2). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2022.0978>
12. Vargas en Mirna (2007), Estrategias de evaluación e Intervención Psicológica, UNAM FES Zaragoza, pp 127-161.

# Vinculación con la industria

**MERCK**



# “Design Thinking”: la herramienta para Innovar y acelerar nuevos negocios en el área de nanotecnología.

Amanda Anselmi Baumgartner, Ángel Martínez

Merck, S.A de C.V. Calle 5 No. 7, Fraccionamiento Industrial Alce Blanco Naucalpan de Juárez.  
53370. Estado de México, México

[amanda.baumgartner@merckgroup.com](mailto:amanda.baumgartner@merckgroup.com)

[angel.martinez@merckgroup.com](mailto:angel.martinez@merckgroup.com)

## Resumen

La nanotecnología es una tecnología disruptiva y muy importante para varios sectores económicos de México. Urge la necesidad de incentivar la investigación científica aplicada a la industria e impulsar nuevos desarrollos que generen ventajas competitivas y que permitan destacar a México como un país con potencial para ser un gran aliado en materia de innovación, en el escenario internacional. Es en este contexto que metodologías enfocadas en el pensamiento de diseño “Design Thinking” se han mostrado muy pertinentes para encontrar soluciones enfocadas en las necesidades del consumidor o mercado. Este artículo va a detallar las fases del proceso de “Design thinking” que son: 1. Desarrollar empatía y descubrir el problema; 2. Definir el problema; 3. Idear la solución; 4. Creación de prototipos; 5. Pruebas y validación, y por fin traer los puntos clave para tener éxito en cada etapa para el desarrollo de soluciones efectivas. Además de eso, se va a discutir cómo las colaboraciones entre

investigadores y la industria, a través del “Research hub” y “hubs” de Innovación, pueden hacer ese proceso más efectivo y acelerar la conversión de proyectos e ideas en negocios de impacto<sup>2,5,8,9,10</sup>.

## Palabras Clave

Nanotecnología, Design Thinking, Pensamiento de diseño, Innovación, colaboración, networking, investigación, ciencia aplicada, prototipo, solución, problema, cliente, consumidor, ideas, brainstorming, Hub, Reserach Hub, Innovation Hub, disruptivo, tecnologías disruptivas, Deep tech, product market fit.

## Introducción

La nanotecnología tiene un gran potencial para transformar la ciencia y la industria en varias áreas, tales como construcción, automotriz, alimentos y, principalmente, el área de la biotecnología y de la salud<sup>1</sup>. En América Latina, México y Brasil producen el 90 % de las patentes registradas en la materia. En México, la nanotecnología



representa un estandarte de innovación, consolidándose como uno de los campos de la ciencia con mayor crecimiento en los últimos años, marcando un punto de convergencia entre conocimiento y especialistas de diferentes áreas. México está posicionado como número tres en el área de nanotecnología, solo por debajo de Estados Unidos y Brasil.<sup>2</sup>

Cuando hablamos de aplicaciones de la nanotecnología en mercados regulados, el sector de la salud es uno de los más dinámicos y prometedores. Aquí, la aplicación de la nanotecnología ha contribuido con el desarrollo y mejora de sistemas y procesos innovadores de prevención, diagnóstico y tratamiento de distintas enfermedades<sup>3</sup>. Diversos estudios prevén que el mercado mundial de la nanomedicina (conversión de la nanotecnología con la medicina y biología) duplicará su valor durante los próximos cinco años, superando los 290

000 millones de dólares, de los cuales, el 10 % corresponderá a países de América Latina (destacando la participación de México y Brasil)<sup>3</sup>. Sin embargo, los retos para transformar la producción científica en soluciones reales para el mercado de la salud son aún mayores, toda vez que esa tecnología es capaz de resolver problemas actuales con alto valor agregado o construir las organizaciones del futuro<sup>3,4</sup>. Se pueden mencionar algunos bloqueos y desafíos en la material, tales como ciertas cuestiones regulatorias, éticas, gestión de calidad, habilidades técnicas, estándares internacionales, captación de recursos e inversiones, estructura para escalonamiento de soluciones, entre otras.<sup>3,4</sup>

Por eso urge la necesidad de incentivar la investigación científica aplicada a la industria e impulsar nuevos desarrollos en tecnologías disruptivas, como la nanotecnología, que generará ventajas competitivas que permitirán destacar a México como un país con potencial para ser un gran aliado en materia de innovación en el escenario internacional<sup>2</sup>.

Es en este contexto que metodologías enfocadas en el pensamiento de diseño “Design Thinking” se han mostrado muy pertinentes para encontrar soluciones enfocadas en las necesidades del consumidor o mercado<sup>5</sup>. Por proporcionar una estructura al proceso de innovación, el pensamiento de diseño ayuda a los innovadores a colaborar y acordar lo que es esencial para el resultado en cada fase y así acelerar la conversión de ideas en nuevos negocios<sup>5,6</sup>.

“Design Thinking” es una metodología que profundiza en las necesidades del cliente para encontrar un problema desde una

perspectiva humana. El diseño tiene un papel importante que desempeñar para ayudar a identificar, diseñar, lanzar y escalar el negocio adecuado<sup>5,6,7</sup>.

El proceso de diseño tiene en su esencia 5 fases: 1. Desarrollar empatía y descubrir el problema; 2. Definir el problema; 3. Idear la solución; 4. Creación de prototipos; 5. Pruebas y validación. En seguida, se van a conocer los puntos clave y herramientas de cada etapa, y para finalizar se va a comentar cómo las colaboraciones y “hubs” de Innovación pueden hacer ese proceso más efectivo<sup>8,9</sup>.

### Desarrollar empatía y descubrir el problema

La creación de un producto diseñado para abordar las necesidades de los usuarios requiere una comprensión profunda de cómo se comportan e interactúan, cuáles son sus puntos débiles y qué falta en la experiencia del usuario. En esta fase, lo más importante es identificar las necesidades ocultas haciendo que el innovador viva la experiencia del cliente. Los puntos clave en esa etapa son: encontrar un problema grande e importante que muchos usuarios tengan; enamorarse del problema; construir una visión de emprendedor. Para eso, las herramientas más indicadas son lluvias de ideas empezando con “Cómo nosotros podemos...” Hacer una pregunta más interesante puede ayudar a los equipos a descubrir ideas más originales. Pensar no solo en lo que los usuarios necesitan, pero por qué lo necesitan. Otras herramientas que también pueden ayudar a aclarar cuestiones sobre el problema son la matrix CSD (certezas, suposiciones y dudas); los 5W2H (“Why, Where, When, What, Who, How; How Much”) y una de las más importan-

tes para generar empatía y descubrir los puntos de dolor del cliente es el Mapa de empatía del usuario. Con esas herramientas será posible tener una mejor definición del problema que se desea resolver<sup>8,9</sup>.

### Definir el problema

En la etapa de definición del problema, los puntos y herramientas claves son: la validación con usuarios y “stakeholders” donde se puede elegir un número limitado de personas y hacer entrevistas y coletas de feedback sobre el problema sugerido; investigación de mercado práctica y teórica en informes de mercado, y traducir los datos generados en la primera etapa en informaciones relevantes. Por lo tanto, se utilizan los conocimientos obtenidos de la empatía para crear una descripción concisa del problema de diseño. La descripción tiene que ser lo suficientemente amplia para permitir sugerencias creativas y lo suficientemente limitada para ser solucionables. La solución debe ser factible y escalable, no puede basarse en tecnología o materiales inalcanzables<sup>8,9</sup>.

### Idear la solución

La ideación es una forma de lluvia de ideas (“Brainstorming”) en la que un grupo diverso de personas aporta ideas. Los puntos



esenciales en esa etapa son: La diversidad, colaboración, ambiente seguro, reconocer que el cliente o usuario siempre estarán en el centro de la idea y que cada participante se sienta empoderado para presentar ideas. El enfoque de ese grupo de personas debe ser en las ideas que escalan para su uso futuro y que identifiquen nuevas oportunidades o direcciones. Algunas herramientas para esa etapa son los “Crazy 8,s” donde cada participante tiene que dar una idea por minuto y romper las barreras, porque ninguna idea es mala, y la herramienta “Worst posible idea” para estimular la creatividad, los usuarios deben pensar al revés en lo que consideran una idea mala para la solución del problema<sup>8,9</sup>.

### Creación de prototipos

En ese punto es necesario tomar las ideas generadas por el equipo de ideación y crear soluciones. Esta fase es iterativa. Hay momentos de creación individual de prototipos, análisis y votación. También se pueden unir partes de diferentes prototipos o crear diferentes versiones de la posible solución hasta que el resultado final combine diseño y desarrollo en una unidad funcional que satisfaga lo que los usuarios realmente quieren. Tómese el tiempo suficiente para refinar y mejorar la solución a la que llega. Los puntos clave en esa etapa son: creación de artefactos básicos y de bajo costo, que capturarán las características esenciales de la experiencia de usuario propuesta; ganan en flexibilidad, porque pueden modificarse fácilmente en respuesta a lo que se aprende al exponerlos a los usuarios. Aquí también es el momento de recolectar comentarios y “feedbacks” de los usuarios y las partes interesadas del proyecto hasta que esté seguro de que resuelve el problema que definió al principio<sup>8,9</sup>.



### Pruebas y validación

Una vez que la mejor solución sea identificada y desarrollada, es el momento de iniciar una fase de prueba beta para incorporar a los usuarios finales. En esa última etapa es importante observar cómo funciona, cómo reaccionan los usuarios y si resuelve el problema inicial de forma satisfactoria. También es necesario recopilar comentarios e identificar cualquier error, acierto o cuello de botella. Si la solución funciona según las especificaciones definidas por su equipo de diseño, ya sabe que tiene un lanzamiento exitoso en sus manos<sup>8,9</sup>.

### Colaboración para acelerar: “Innovation Hub y Research Hub”

A pesar de que el pensamiento de diseño es una forma rápida y efectiva de desarrollar nuevos productos cuando la solución está basada en el uso de tecnologías disruptivas y científicas como la nanotecnología, puede haber algunos bloqueos, como la falta de personas calificadas o la falta de estructura para desarrollar prototipos, estructura para análisis regulatorio de calidad y estructura para pruebas de validación que confirmen la efectividad y escalabilidad de la solución<sup>3</sup>. Para reducir esos bloqueos, el ecosistema de Innovación de Merck ha creado un concepto llamado “In-

novation Hub”. Esos “hubs” de Innovación son colaboraciones técnicas, científicas y comerciales entre Merck y universidades con el objetivo de acelerar el desarrollo de prototipos, validación y capacitación de personas en el área de tendencias tecnológicas.<sup>10</sup> En junio de 2023 fue lanzado el “Hub” de innovación de Nanotecnología, una colaboración de Merck con la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), con la finalidad de ofertar para la comunidad científica de toda América Latina Proyectos de codesarrollo y avance de prototipos TRL4-8; servicios especializados: análisis y caracterización de materiales, perfil toxicológico, entre otros y cursos teóricos y prácticos. Entre en contacto con Merck para obtener más informaciones y contratar los servicios del “Hub” de Innovación de nanotecnología<sup>10</sup>.

Otra iniciativa para acelerar la conversión de ideas y proyectos en negocios es el “Research Hub”, un foro de vinculación entre academia e industria para beneficio de ambos. El objetivo del evento es generar “networking” entre colegas de la industria de un segmento definido, como por ejemplo farmacéutica, biotecnológica, diagnóstica e investigadores; apoyar el desarrollo de investigaciones científicas en el entorno académico de México y generar sinergias con la industria, a través de charlas, talleres, laboratorios de innovación, así como generar vínculos valiosos para futuras iniciativas y/o negocios.

Tal como fue presentado, la estructura del pensamiento de diseño crea un flujo natural desde la investigación hasta el lanzamiento<sup>6</sup>. La inmersión en la experiencia del cliente produce datos que se transforman en conocimientos, que ayudan a los equipos a acordar los criterios de diseño que

utilizan para generar soluciones. Las suposiciones sobre lo que es fundamental para el éxito de esas soluciones se examinan y luego se prueban con prototipos a los usuarios de la solución<sup>6,9</sup>. Además de eso, colaboraciones y el concepto de “Hub” de innovación y el “Research Hub” son esenciales para acelerar las etapas de diseño y llegar a soluciones efectivas y escalables, generando así, nuevos potenciales negocios con uso de tecnologías disruptivas<sup>10</sup>.

### Referencias Bibliográficas:

1. “Application of nanotechnology in food engineering: a review”; Junges, A; Research, Society and Development, v. 11, n. 2, e3611225389, 2022.
2. ¿Qué tan importante es la nanotecnología en México?; ConsumoTIC, 12 april, 2022, disponible en: <https://consumotomic.mx/tecnologia/que-tan-importante-es-la-nanotecnologia-en-mexico/>
3. La nanomedicina: una oportunidad de gran escala para México; Ocegüera, Y. O; El Economista; 08 de Mayo de 2018, disponible en: <https://www.economista.com.mx/opinion/La-nanomedicina-una-oportunidad-de-gran-escala-para-Mexico-20180507-0148.html>
4. Expertos abordarán temas de nanotecnología durante el NSGC en México; Forbes Staff; Forbes, septiembre 17, 2021. Disponible en: <https://www.forbes.com.mx/expertos-abordaran-temas-de-nanotecnologia-durante-el-ns-gc-en-mexico/>
5. Design Thinking: la herramienta para innovar y humanizar tus servicios; Forbes Staff; Forbes; noviembre 26, 2018; Disponible en: <https://www.forbes.com.mx/design-thinking-la-herramienta-para-innovar-y-humanizar-tus-servicios/>
6. “Why Design Thinking Works”; Liedtka, J; Harvard Business Review; Septiembre, 2018. Disponible en: <https://hbr.org/2018/09/why-design-thinking-works>;
7. “The power of design thinking”; Podcast; McKinsey Digital; Marzo 2016; Disponible en: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-power-of-design-thinking>
8. “How design helps incumbents build new businesses”; Kilian, j; Libarikian, A; ; McKinsey & Company; Abril 26, 2023; Disponible en: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-design/how-we-help-clients/design-blog/how-design-helps-incumbents-build-new-businesses>.
9. “The Benefits Of Incorporating Design Thinking Into Business”; Higgins, M; Forbes; Noviembre 2020; Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/forbes-techcouncil/2020/11/05/the-benefits-of-incorporating-design-thinking-into-business/?sh=2304ddd555a8>
10. Nanotechnology Innovation Hub Catalogue; Misael Silva; Junio de 2023; Disponible por correo: [Misael.silva@merckgroup.com](mailto:Misael.silva@merckgroup.com)



# Merck en la administración de medicamentos

Elizabeth Aisenbrey, Alain Flores

Merck, S.A de C.V. Calle 5 No. 7, Fraccionamiento Industrial Alce Blanco

Naucalpan de Juárez. 53370. Estado de México, México

[elizabeth.aisenbrey@milliporesigma.com](mailto:elizabeth.aisenbrey@milliporesigma.com)

[alain.flores@merckgroup.com](mailto:alain.flores@merckgroup.com)

## Resumen

Los rápidos avances en química y biotecnología han impulsado el desarrollo en ciencias de la vida. Las oportunidades que ofrece Merck en nanotecnología, alineados con la sustentabilidad y el descubrimiento de fármacos, son amplias. Este último, enfocado al desarrollo de nuevos candidatos a fármacos altamente potentes y específicos. Este artículo presentará brevemente los avances en la nanomedicina y las formulaciones de administración de fármacos con la finalidad de realizar aportaciones a la investigación en este campo científico.

## Keywords

Drug delivery, Sistema de liberación de fármacos, nanopartículas, liposomas, dendrímeros, nanomedicina, dendrímeros, quantum dots, nanotubos, nanotecnología.

## Introducción

El propósito de Merck es resolver los problemas más complejos de las ciencias de la vida colaborando con la comunidad científica global y, de este modo, acelerar el acceso a la sanidad de todo el mundo.

La administración de medicamentos es uno de los focos de interés de Merck. En esta área se utilizan varias tecnologías de administración de medicamentos para inducir efectos terapéuticos en el lugar de acción, reduciendo a la vez los posibles efectos adversos, al influir en la absorción, distribución, metabolismo y eliminación de un compuesto farmacológico. Los avances logrados en medicina y biotecnología han llevado al desarrollo de un gran número de nuevos candidatos de fármacos,



Figura 1. Cápsula para liberación de fármacos



muchos de los cuales fracasan durante la evaluación preclínica (debido a su limitada biodisponibilidad, poca estabilidad o baja solubilidad).

Los avances en nanotecnología han mejorado en gran medida el diseño de fármacos, al permitir formulaciones farmacológicas dirigidas, inocuas y efectivas con nanopartículas (NP). Los sistemas de administración de nano fármacos han demostrado un gran potencial para mejorar la solubilidad de los medicamentos hidrófobos; aumentar la biodistribución y farmacocinética, y proporcionar acumulación preferente en el sitio de destino.

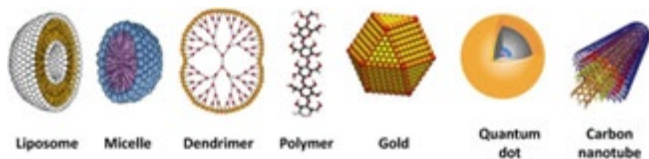


Figura 2. Tipo de nanopartículas para aplicaciones biomédicas (a) polímeros, (b) liposomas, (c) ciclodextrinas, (d) dendrímeros, (e) nanopartículas de oro, (f) micelas, (g) nanotubos de carbono y (h) quantum dots [1]

Se han empleado diversos nanotransportadores en la formulación de la administración de medicamentos, como los liposomas, las micelas poliméricas, los dendrímeros, los conjugados polímero-medicamento, las nanopartículas inorgánicas y los nanomateriales de carbono. Los liposomas son los nano-transportadores más comunes y mejor investigados, mientras que las nanopartículas poliméricas han emergido como uno de los enfoques más innovadores para la administración de fármacos. Ver Figura 2.

Para la selección de un sistema de administración de fármacos se tienen tres categorías: portadores coloidales, hidrogeles y conjugados poliméricos. La selección de un sistema de administración de fármacos

está impulsada por la naturaleza de un medicamento y las propiedades inherentes al sistema de administración de fármacos. Ver Figura 3.

## Síntesis de nanopartículas y micropartículas

Las micropartículas y las nanopartículas son una clase única de materiales con un enorme potencial tecnológico en aplicaciones de ingeniería, imagen, medicina y medio ambiente. Las nanopartículas se definen como partículas cuya dimensión física es, como mínimo, inferior a 100 nanómetros. Las micropartículas tienen una dimensión física comprendida aproximadamente entre 1 y 1000 micras. Pese a tener la misma composición que el material a granel correspondiente, debido a efectos del tamaño, estas partículas exhiben características ópticas, eléctricas, térmicas y magnéticas excepcionales. Los investigadores han desarrollado métodos de síntesis para controlar aún más sus propiedades, forma, composición y distribución de tamaño para que se adapten mejor a aplicaciones específicas.

La síntesis de micropartículas y nanopartículas se consigue normalmente por métodos físicos y químicos. En los métodos físicos, las partículas se crean mediante la

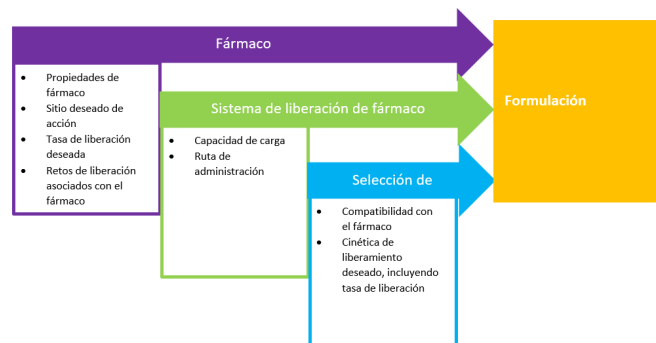


Figura 3.- Proceso de selección en la formulación en sistema de liberación de fármacos

reducción del tamaño del material original, un enfoque denominado descendente para la microfabricación y la nanofabricación. Las técnicas físicas consisten en molienda, condensación gaseosa, electropulverización, litografía y descomposición térmica. En muchos métodos químicos, las partículas se crean mediante nucleación y crecimiento de las partículas desde los precursores atómicos o moleculares, normalmente en la fase líquida o de vapor de una reacción química (el denominado enfoque ascendente). Los métodos químicos para la síntesis de micropartículas y nanopartículas consisten en procesos de microemulsión, hidrotérmicos, microfluídica, vapor químico, hidrólisis y sol-gel. La síntesis química de las nanopartículas produce nanoestructuras con menos defectos, proporciona acceso a composiciones químicas más complejas y homogéneas, y es fácilmente escalable a una fabricación rápida y de bajo coste.

Dado que estas técnicas suelen ser muy laboriosas y rinden productos secundarios tóxicos, han surgido métodos biológicos o métodos ecológicos de síntesis de nanopartículas, como la biogénesis con microorganismos y extractos vegetales. Estos métodos sostenibles producen partículas ecológicas, no tóxicas, adecuadas para las aplicaciones biomédicas y medioambientales.

### Formulaciones para la administración de fármacos NanoFabTx™

Los avances recientes en la terapéutica de ácidos nucleicos y las formulaciones de administración de fármacos se han vuelto extremadamente importantes y esenciales para la administración, eficacia y estabilidad de muchos ingredientes farmacéuticos activos (API). Sin embargo, desarrollar la

formulación que mejor se adapte a su API puede ser un proceso complicado y lento, que a menudo requiere una extensa optimización de prueba y error. Para ayudar a agilizar el proceso de formulación y síntesis de partículas, se ha desarrollado la plataforma NanoFabTx™ para que sea su colaborador en formulaciones.

Entre las posibles aplicaciones de nuestra plataforma NanoFabTx™ se encuentran las siguientes:

- Administración de moléculas pequeñas y ácidos nucleicos.
- Detección y selección de formulaciones óptimas para liposomas, nanopartículas y micropartículas.
- Control y determinación del tamaño óptimo de la partícula.
- Optimización de la eficiencia y la capacidad de carga del medicamento.



Figura 4. Kits de formulación NanoFabTx™

### Kits de formulación de polímeros farmacológicos NanoFabTx™ para la síntesis de medicamentos encapsulados en partículas

Los kits NanoFabTx™ están diseñados para preparar micropartículas y nanopartículas poliméricas de tamaño específico para la administración de moléculas pequeñas. Cada kit contiene polímeros seleccionados racionalmente que han sido desarrollados y probados por nuestros científicos de formulación. Los kits de cribado de formulación NanoFabTx™ facilitan la selección y la

optimización de los polímeros suministrando varios polímeros para elegir, tales como polímeros biodegradables PLA, PLGA y PCL pegilados y no pegilados.

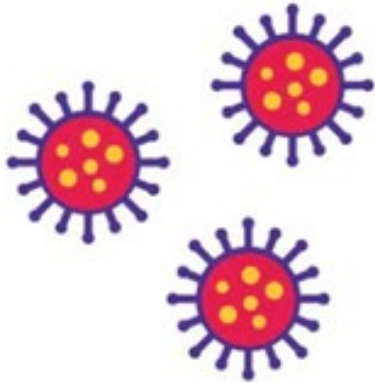


Figura 5.- Síntesis de medicamentos encapsulados

### Mezclas lipídicas NanoFabTx™ para la producción de liposomas

Los liposomas se utilizan en una amplia variedad de tratamientos, incluidos las moléculas pequeñas, los ácidos nucleicos (ARNm, siRNA, ADN), las proteínas y los péptidos. Nuestras mezclas de formulación lipídica NanoFabTx™ son mezclas seleccionadas de lípidos para la preparación de liposomas. Ofrecemos una variedad de mezclas lipídicas para adaptarse mejor a sus requisitos de nanoformulación, como liposomas pegilados, catiónicos y funcionalizados.

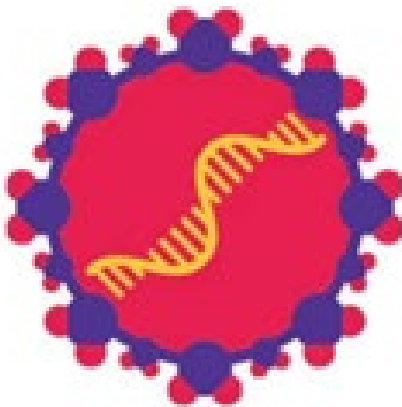


Figura 6.-Mezclas lipídicas para producción de liposomas

### Kits de dispositivos de microfluídica NanoFabTx™ para la síntesis de nanopartículas poliméricas y lipídicas

Los dispositivos de microfluídica son una plataforma para la fabricación rápida y reproducible de micropartículas, nanopartículas lipídicas y liposomas. A diferencia de los métodos tradicionales, la síntesis de nanopartículas con base microfluídica produce tamaños de partículas controlados y una distribución de tamaño reducida, y puede escalarse fácilmente para producir los lotes de mayor tamaño que se necesitan en los ensayos preclínicos.

En nuestros kits de dispositivos de microfluídica NanoFabTx™ hay un chip de vidrio microfluídico premontado, tubos y accesorios, y puede conectarse directamente a un sistema de bomba de jeringa o de bomba presurizada, como la Dolomite Microfluidics MitoS P-Pump. Los kits de dispositivos de microfluídica NanoFabTx™ están diseñados para funcionar junto con nuestros kits de formulación de fármacos y mezclas lipídicas NanoFabTx™.

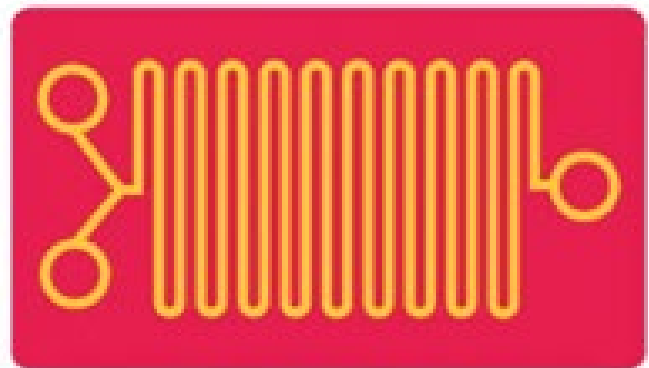


Figura 5.-Dispositivos para la síntesis de nanopartículas poliméricas y lipídicas

## Referencias Bibliográficas:

1. Hassett KJ, Benenato KE, Jacquinet E, Lee A, Woods A, Yuzhakov O, Himansu S, Deterling J, Geilich BM, Ketova T, et al. 2019. Optimization of Lipid Nanoparticles for Intramuscular Administration of mRNA Vaccines. *Molecular Therapy - Nucleic Acids*. 151-11. <https://doi.org/10.1016/j.omtn.2019.01.013>
2. Blakney AK, McKay PF, Yus BI, Aldon Y, Shattock RJ. 2019. Inside out: optimization of lipid nanoparticle formulations for exterior complexation and in vivo delivery of saRNA. *Gene Ther* 26(9):363-372. <https://doi.org/10.1038/s41434-019-0095-2>
3. Reichmuth AM, Oberli MA, Jaklenec A, Langer R, Blankschtein D. 2016. mRNA vaccine delivery using lipid nanoparticles. *Therapeutic Delivery*. 7(5):319-334. <https://doi.org/10.4155/tde-2016-0006>
4. Pardi N, Hogan MJ, Porter FW, Weissman D. 2018. mRNA vaccines a new era in vaccinology. *Nat Rev Drug Discov*. 17(4):261-279. <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.243>
5. Carugo D, Bottaro E, Owen J, Stride E, Nastruzzi C. 2016. Liposome production by microfluidics: potential and limiting factors. *Sci Rep*. 6(1): <https://doi.org/10.1038/srep25876>
6. Sung YK, Kim SW. 2020. Recent advances in polymeric drug delivery systems. *Biomater Res* 24(1): <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00190-7>
7. Liechty WB, Kryscio DR, Slaughter BV, Peppas NA. 2010. Polymers for Drug Delivery Systems. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 1(1):149-173. <https://doi.org/10.1146/annurev-chem-bioeng-073009-100847>



# Apoyo a lo docencia: Estima la velocidad de la luz (cocinando quesadillas)

Astron Martínez

Asociación civil DiVU: Diversidad, cultura, género, alimentación y ciencia [www.divu.mx](http://www.divu.mx)  
[astronr@hotmail.com](mailto:astronr@hotmail.com)

Admito haber metido soldaditos de plástico, crayolas, superficies metalizadas, hormigas y toda clase de objetos al microondas de mi casa durante la infancia. No fui el único. La mayoría de personas científicas que conozco también fueron *niños destroyers* o curiosos experimentadores natos. Aclaro que nunca (casi nunca) fueron sujetos experimentales las tortuguitas japonesas, hámsteres, pequeños animales de compañía o la infortunada fauna nativa que es tan abundante en nuestra América Latina, en mi pueblo natal o en las grandes ciudades. Y es que, en esta región del mundo, el ingenio y la creatividad palían la falta de infraestructura, instrumentos científicos de precisión o costosos reactivos. En esta práctica de ciencia casera pretendo mostrar que puede ser posible (divertido y muy delicioso) hablar de electromagnetismo, física experimental y estimar el valor de “c” con quesadillas hechas en un horno de microondas. Esto sin poner en riesgo la vida útil del electrodoméstico ni de aquellas osadas personas que gusten replicarlo desde la comodidad de



sus casas. La velocidad de la luz (representada con la letra *c* en minúscula) es una de esas constantes físicas que se utilizan para todo. De ahí derivamos patrones primarios de medición, otras constantes, respondemos trivias científicas de juegos de mesa o hacemos graciosos memes viales que aluden a la “Velocidad máxima permitida”. Estimar el valor de “c” nunca fue sencillo. De hecho, fue un problema que atormentó a los experimentadores más minuciosos por varios siglos. La naturaleza misma de la luz fue puesta en duda muchas veces,

hasta que llegó Maxwell y sus ecuaciones en el siglo XIX, y la mecánica cuántica, en el XX. ¿Quién diría que la respuesta puede hallarla en su cocina, con una regla y algo de paciencia? Preparar quesadillas de microondas puede acercarnos a desentrañar algunos secretos de las ondas transversales de radiación electromagnética (como la luz visible o las microondas) y de la física moderna. Hay más hogares mexicanos con un horno de microondas que hogares con videojuegos, servicio de películas, música o videos de paga por internet juntos. Hay más hogares con microondas que hogares con línea telefónica fija y más de la mitad de personas que tienen celular tienen microondas. Con todo y su prevalencia, en un estudio que publiqué el año pasado pude inferir que al menos 7 de cada 10 personas creen que *usar este electrodoméstico es dañino si lo comparamos con otros métodos de calentamiento como la estufa*. Cabe resaltar que, en prácticamente medio siglo de la llegada de microondas a nuestro país, no se han demostrado sus efectos nocivos al ambiente, los alimentos o la salud humana. En los laboratorios de ciencia experimental de nuestro instituto (y bastantes otros alrededor del mundo) se utilizan microondas para realizar pruebas en distintos materiales, síntesis de otros tantos y procesos unitarios básicos de rutina. Este experimento en particular explota el hecho de que los hornos de microondas comerciales utilizan ondas estacionarias (es decir, que no se propagan en el tiempo) y también el hecho de que el diseño de la mayoría de los modelos consta de una bandeja giratoria cargada de alimentos (la comida es lo que se mueve y no el magnetrón que genera las ondas ni la antena que las distribuye). Si tu microondas es del que “da vueltas” para calentar la comida podemos continuar.

## ¿Qué necesitas?

- Una regla escolar (que pueda medir milímetros y centímetros).
- Un microondas comercial (y permiso de sus dueños para utilizarlo).
- Toma de corriente (de nada va a servirnos el microondas apagado).
- Tortillas (frescas de maíz, de trigo o en bolsa, según la disponibilidad, según tu gusto. Nuestro público sonoreño seguro preferirá las sobaqueras de harina, en Oaxaca pueden usar una tlayuda o un *guetabiguii* zapoteco y en la CDMX se pueden usar tantas minitortillas de tacos al pastor como sean necesarias para cubrir una buena parte del plato extendido que utilices para esta práctica. Cualquier variante sirve, en tanto pueda calentarse en microondas y cubra mucho del suelo o plato de tu equipo electrónico).
- Queso manchego en rebanadas delgadas (o el queso, que funda, de tu elección. Lo importante es que sea un queso sólido de geometría regular y capaz de derretirse o dorarse en el microondas, así que quedan descartados los requesones, queso de hebra, queso panela, queso crema, quesos frescos en general y quesos en polvo; pero se pueden utilizar aquellos quesos que vienen en barras “fileteables” como el queso Chihuahua, queso Gouda, queso Edam, queso menonita tipo Chester o el queso americano amarillo).
- Plato, bandeja o trozo de cartón (para separar el piso del microondas de la quesadilla. Debe ser apto para microondas).
- Una calculadora (repasar cómo hacer multiplicaciones y divisiones largas de forma manual no vendría nada mal).
- Bitácora (quieres llevar un buen registro, ya sea físico o digital, de tus obser-

vaciones, además de un lugar en donde puedas hacer los cálculos).

- Gusto por las quesadillas y por el queso (si las quesadillas llevan queso o no llevan queso es un debate que sobrepasa nuestra capacidad teórica).

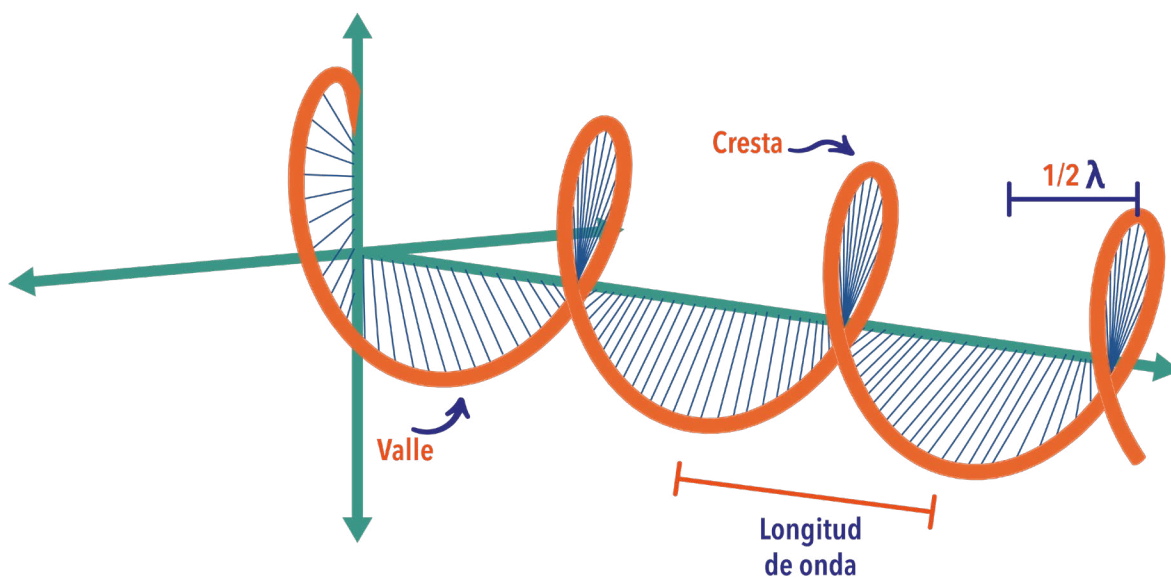
Tolerancia a la frustración y paciencia (los experimentos científicos rara vez salen a la primera. Es probable que necesites repetirlos variando las condiciones, utilizando diferentes equipos o diferentes materiales, antes de que te salga).

### Antes de empezar

Asegúrate de buscar la frecuencia del microondas que vas a usar. Aparece en las especificaciones técnicas, ya sea buscando en internet, impreso en el reverso del electrodoméstico o en el instructivo. La “frecuencia” nos permite conocer qué tanto ocurre un fenómeno (recurrente en el tiempo) y sus unidades son los Hertz (Hz),

que equivalen al inverso de un segundo ( $s^{-1}$ ). En electromagnetismo, la frecuencia es el inverso matemático del tiempo que transcurre entre dos crestas o dos valles de una onda. No la confundas con la frecuencia de entrada de la toma de corriente, que suele ser de apenas 60 Hz; el valor que buscas está en el orden de miles de millones de Hertz (GHz o MHz).

Tal como lo mencioné al principio de este artículo, el horno de microondas debe ser “del tipo que gira los alimentos en una charola”. Esta charola, generalmente fabricada de vidrio refractario, debe poder retirarse del riel y del motor inferior que la hace girar. Es necesario retirarla antes de empezar el experimento (se puede volver a poner, calma, pues prácticamente todos los modelos están diseñados para permitir quitar la charola y lavarla cuando se ensucie. Y cuida de no romperla, los repuestos son difíciles de conseguir).



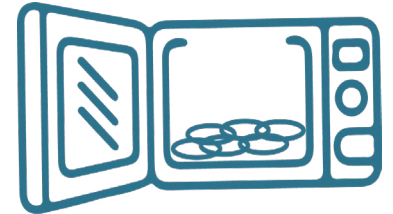
## Procedimiento experimental

1. Retira o inactiva la bandeja giratoria de tu microondas.  
2. Cubre tanto del piso de tu electrodoméstico como sea posible haciendo uso de un trozo de cartón grueso, una bandeja apta para el mismo o un plato grande extendido.  
3. Coloca tantas tortillas como sea necesario para cubrir una muy buena parte central del cartón, bandeja o plato que hayas colocado. No dejes espacios vacíos entre las tortillas.



4. Arriba de las tortillas coloca las láminas delgadas de queso y, nuevamente, evita dejar espacios vacíos. Se obtienen mejores resultados si el queso está muy frío (recién salido del refrigerador).

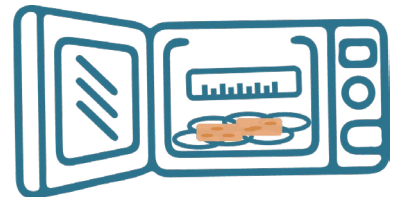
5. Enciende tu microondas a máxima potencia durante uno o dos minutos. Recuerda, sin girar la comida.



6. Observa cómo el queso comienza a reblandecerse, luego a fundirse, burbujear y finalmente a dorarse, ¡pero no lo está haciendo de forma homogénea!

7. Observarás cómo se forma un patrón más o menos definido de manchas oscuras, que bien podrían ser de queso dorado, huecos derretidos o incluso de tortilla quemada (depende de cuánto tiempo mantuviste encendido el microondas). El queso alrededor de estas manchas debe estar mucho más frío que el resto del queso (que solo recibió calor por conducción), así que debes apresurarte a realizar las siguientes mediciones.

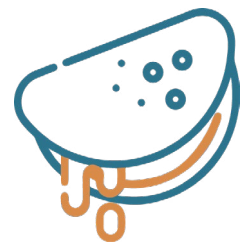
8. Podrían formarse muy pocas manchas (apenas un par) o varias, depende un tanto del equipo electrónico. Algunas de las manchas van a tener formas bastante regulares y otras serán amorfas, asegúrate de elegir aquellas que sean más circulares y que estén repartidas de forma más regular.



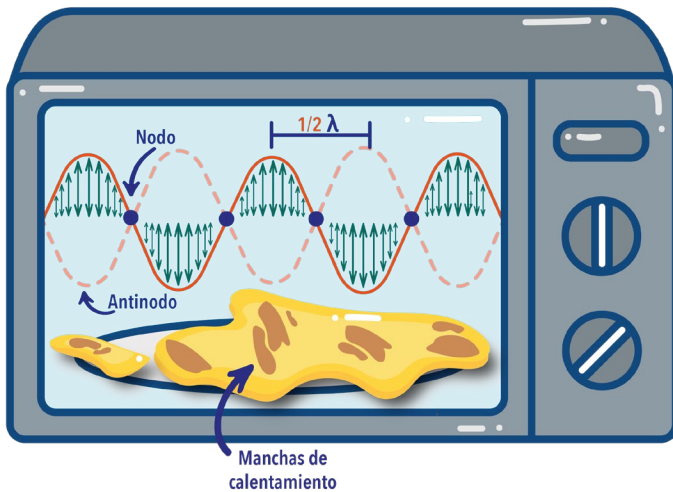
9. Mide las distancias entre mancha y mancha haciendo uso de la regla. Idealmente, de centro a centro. El número de manchas (viables para medición) va a determinar el número de distancias que vas a tener que medir (en este caso, busca la congruencia de los datos, es decir, aquellas mediciones que más se asemejen entre ellas).

10. Anota los resultados de las mediciones en la bitácora sin olvidar incluir las unidades (centímetros) y las condiciones del experimento (fecha del experimento, tiempo adentro del microondas, tipo de queso y tortillas utilizadas, precisión de la regla y todo aquello que consideres importante para la reproducibilidad de esta práctica).

11. Redistribuye el queso separando individualmente las tortillas. Después de doblarlas a la mitad y con la cantidad de queso que hayas elegido, podrás disfrutar de varias quesadillas recién hechas. Puedes volver a calentarlas en el microondas para fundir el queso de forma homogénea (una vez que hayas regresado el plato giratorio a su lugar, claro está).







### ¿Por qué está pasando esto?

Las ondas estacionarias de las microondas permiten que en el interior del horno se tenga un patrón discreto de distribución más o menos definido. Suficientemente definido como para visualizar los efectos que tienen sus crestas y valles al interactuar con nuestra quesadilla y medir la distancia entre los mismos (recordemos que ahí es donde se hallan los antinodos y se presenta el mayor calentamiento). Podemos conocer así la longitud de las ondas que se producen en nuestro horno de microondas, con algo tan sencillo como medir la distancia en centímetros entre una mancha y otra, y multiplicar este resultado por dos (la longitud de onda es el doble de la distancia entre una de las crestas y uno de los valles que la conforman). Y no siempre es posible hacerlo con una regla escolar. En este experimento utilizamos a las microondas y no otro tipo de radiación electromagnética como, por ejemplo, la luz visible (todas estas ondas viajan a la misma velocidad, valor cercano a "c"). Si consultamos su ubicación dentro del espectro electromagnético veremos que las microondas pueden tener longitudes de onda que abarcan un rango de pocos milímetros a menos de un metro. Los hornos de

microondas comerciales modernos utilizan ondas con una longitud de onda cercana a los 13 centímetros, algo que fácilmente podemos medir con una regla. Los datos de la frecuencia y la longitud de onda son suficientes para calcular la velocidad de la onda, que en este caso específico se trata de ondas electromagnéticas (que, como dijimos, viajan a la velocidad de la luz) y la fórmula para calcularla es la siguiente.

$$c = \lambda f$$

Conocemos la frecuencia ( $f$ ) de nuestro horno de microondas, que es proporcionada por la empresa fabricante, y también conocemos la longitud de onda ( $\lambda$ ), pues en el protocolo experimental hemos medido la mitad de esta longitud con una regla. El queso y la tortilla son susceptibles al calentamiento por radiación de microondas, al igual que las grasas, azúcares y agua; por su parte, no son —lo suficientemente— susceptibles los recipientes de vidrio o plástico, ni el aire circundante.

### Cálculos

Para obtener la longitud de onda ( $\lambda$ ) en centímetros debemos multiplicar por dos cada uno de los valores medidos. El número de repeticiones o distancias entre manchas diferentes representa, cada uno, un evento diferente y debemos buscar tener al menos tres valores congruentes. Para pasar esta medición a metros dividiremos el valor entre 100. Al multiplicar este resultado por la frecuencia en Hertz ( $s^{-1}$ ) obtendremos una estimación de la velocidad de la luz. Si la empresa fabricante reporta la frecuencia en megahertz (MHz), debes multiplicar este valor por 1 000 000 para obtener los Hertz correspondientes, en el caso de Gigahertz (GHz), por 1 000 000 000. Yo realicé el ex-

perimento con tres hornos de microondas diferentes (en uno no funcionó, pero en los otros dos sí obtuve resultados favorables). Mis papás me ayudaron a replicar este mis-

mo protocolo experimental, en su casa, en otro estado de la república. Llegué entonces a los siguientes resultados:

Horno de microondas LG modelo MS-2142BP, frecuencia 2 450 MHz, utilizando Tortillinas de harina de trigo y queso manchego.

| Medición | Distancia medida entre mancha y mancha | Longitud de onda aproximada | Longitud de onda en unidades del sistema internacional | Frecuencia del horno en Hertz | Velocidad de la luz estimada  |
|----------|--|-----------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Primera  | 6.3 cm                                 | 12.6 cm                     | 0.126 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 308 700 000 m s <sup>-1</sup> |
| Segunda  | 6.3 cm                                 | 12.6 cm                     | 0.126 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 308 700 000 m s <sup>-1</sup> |
| Tercera  | 6.0 cm                                 | 12.0 cm                     | 0.120 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 294 000 000 m s <sup>-1</sup> |
| Promedio |  |                             |  |                               | 303 800 000 m s <sup>-1</sup> |

Horno de microondas LG modelo MH1596CIR/01, frecuencia de 2450 MHz, utilizando tortillas de maíz y queso menonita.

| Medición | Distancia medida entre mancha y mancha | Longitud de onda aproximada | Longitud de onda en unidades del sistema internacional | Frecuencia del horno en Hertz | Velocidad de la luz estimada  |
|----------|--|-----------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Primera  | 6.1 cm                                 | 12.2 cm                     | 0.122 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 298 900 000 m s <sup>-1</sup> |
| Segunda  | 6.4 cm                                 | 12.8 cm                     | 0.128 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 313 600 000 m s <sup>-1</sup> |
| Tercera  | 6.0 cm                                 | 12.0 cm                     | 0.120 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 294 000 000 m s <sup>-1</sup> |
| Promedio |  |                             |  |                               | 302 166 666 m s <sup>-1</sup> |

Horno de microondas General Electric modelo JES771SK, no se pudo hallar la frecuencia, utilizando Tortillinas de harina de trigo y queso manchego.

| Medición        | Distancia medida entre mancha y mancha                     | Longitud de onda aproximada | Longitud de onda en unidades del sistema internacional | Frecuencia del horno en Hertz                          | Velocidad de la luz estimada |
|-----------------|--|-----------------------------|--|--|------------------------------|
| Primera         | ¿12.0 cm?<br>(Fue difícil hallar congruencia en los datos) | -                           | -  | No se pudo hallar el valor en el equipo ni en internet | -                            |
| <b>Promedio</b> |  |                             |  |  | -                            |

Horno de microondas Emerson modelo MW8107WA, frecuencia de 2450 MHz, probando con tortillas hechas a mano y sin tortillas (utilizando un cartón como soporte), queso procesado en cuadritos de las marcas FUD y Lala.

| Medición        | Distancia medida entre mancha y mancha | Longitud de onda aproximada | Longitud de onda en unidades del sistema internacional | Frecuencia del horno en Hertz | Velocidad de la luz estimada  |
|-----------------|--|-----------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Primera         | 6.4 cm                                 | 12.8 cm                     | 0.128 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 313 600 000 m s <sup>-1</sup> |
| Segunda         | 6.2 cm                                 | 12.4 cm                     | 0.124 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 303 800 000 m s <sup>-1</sup> |
| Tercera         | 6.1 cm                                 | 12.2 cm                     | 0.122 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 298 900 000 m s <sup>-1</sup> |
| Cuarta          | 6.5 cm                                 | 13.0 cm                     | 0.130 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 318 500 000 m s <sup>-1</sup> |
| Quinta          | 5.7 cm                                 | 11.4 cm                     | 0.114 m  | 2 450 000 000 s <sup>-1</sup> | 279 300 000 m s <sup>-1</sup> |
| <b>Promedio</b> |  |                             |  |                               | 302 820 000 m s <sup>-1</sup> |

Podemos observar que las estimaciones del valor de la velocidad de la luz que mi familia y yo obtuvimos en esta práctica se acercan bastante al valor actualmente aceptado, que es de  $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$  en el vacío. Literatura científica con protocolos experimentales parecidos al que aquí presento reportan un error de apenas el 3 %, esto es, llegar a valores experimentales que van de los  $290\,798\,684$  a los  $308\,786\,232\text{ m s}^{-1}$ .



### ¿El horno de microondas es peligroso para la salud? ¿Qué opina la gente?

Aún hay personas que creen que el horno de microondas *les va a dar cáncer*. Erróneamente creen que se *van a quedar estériles* por utilizarlo de forma excesiva o que la *radiación altera significativamente las propiedades nutrimentales de la comida*, por mencionar algunos supuestos daños asociados y prejuicios. Las redes sociales están plagadas de experimentos que “ponen a prueba” mitos urbanos, tales como hacer sonar un celular (o cargar la batería incluida) adentro del micro. Colocar objetos metálicos y ver las chispas también es una

piromaníaca y popular prueba. Hay protocolos experimentales que incluso logran generar plasmas o líquidos supercalentados. Todo eso, en contraste con la práctica casera que acabamos de hacer, sí representa un considerable nivel de peligro.

Pero en tantos años cocinando con hornos de microondas y con tanta gente utilizándolos en todo el mundo (ya sea para la rutina diaria o por la mera diversión de probar las más extravagantes permutaciones), ¿no habríamos notado ya algún cambio lo suficientemente significativo en nuestro organismo o en la comida? ¿Daños genéticos, mayor incidencia de padecimientos en las poblaciones que lo usan más, cambios en la concentración de marcadores químicos dentro de los alimentos o cualquier otro indicador que pueda estar directa y exclusivamente relacionado con el uso excesivo de los hornos de microondas? A la fecha no ha ocurrido. Y debemos recordar que la llegada a México de los primeros equipos destinados al público general fue en los años 70, como mencionamos al principio de este artículo. Pero “la prueba del tiempo” al parecer no ha sido suficiente para mejorar la percepción pública del 73.29 ± 0.02 % de personas que contestaron que “Es mejor calentar la comida en la estufa que en el microondas”, en una gran encuesta (N = 1643) que realicé en 2019 para conocer aspectos de cultura científica y pseudociencias en algunas poblaciones socialmente vulneradas de nuestro país. El porcentaje de personas que contestaron “No sé” es apenas un poco mayor que el de las personas que negaron esta afirmación. Puedo mencionar que este último grupo se encuentra más cerca del consenso científico actual (la estufa no es mejor que el horno de microondas en términos de salud)

y estas personas son, en promedio, 3 años mayores que quienes contestaron que sí es mejor calentar la comida en la estufa que en el microondas, también pertenecen a un nivel socioeconómico más privilegiado (C+, en comparación con C) y aciertan más cuando se le pregunta sobre temas científicos (calificación 1.3 puntos mayor en una Escala de Conocimientos Fácticos).



Analizando los datos de algunas de las poblaciones más discriminadas de nuestro país (que es mi tema de estudio y campo de acción como activista social), no encontré una diferencia considerable entre el grupo de personas entrevistadas que usan drogas en comparación con el grupo de personas que no usan drogas, en esta pregunta en particular. Tampoco encontré una diferencia sustancial entre personas que pueden ser clasificadas como “conservadoras” en comparación con las “no conservadoras” (en temas que abarcan derechos de las mujeres, derechos de la población LGBTI+, discriminación por VIH o discapacidad). Donde sí hallé una diferencia pronunciada es en el grupo de hombres homosexuales en comparación con el grupo de personas heterosexuales (de la misma edad y nivel socioeconómico), pues 19.02 ± 0.05 % negó

la afirmación antes planteada (acercándose más al consenso científico actual que establece que el horno de microondas es seguro) en comparación con un  $11.75 \pm 0.05$  % de heterosexuales. En el mismo sentido, pero con una diferencia menos pronunciada, se encontraron a las personas trans entrevistadas, seguidas de las mujeres lesbianas. En el sentido inverso (misma respuesta que los heterosexuales) se encontró a la población bisexual, asexual y heteroflexible. Los detalles metodológicos generales y otros bastante interesantes resultados pueden encontrarse en mi tesis de grado, citada en las referencias. Aquellos resultados específicos para la percepción del horno de microondas se presentan por primera vez en este artículo y refuerzan la idea de que es necesario hacer más estudios de la prevalencia de pseudociencias y desinformación en poblaciones socialmente vulneradas.

## Referencias

1. Hajduk, Michael; Uffalussy, Karen J.; Granite, Evan J. (2016). Determining the Speed of Light Using a Microwave Oven, National Energy Technology Laboratory (NETL).
2. Martínez Rosas, Astron Rigel. (2022). Divulgación científica dentro de una organización de la sociedad civil con énfasis en la divulgación de la Química y en el activismo social enfocado a la población LGBTI+ (tesis de licenciatura). Facultad de Química, UNAM, México.
3. Moscota, Miguel. (26 de enero de 2021). Economía: 48% de los hogares mexicanos no cuenta con internet: Censo 2020, El CEO.
4. Portal único de gobierno. (2014) México: Estudios de calidad de hornos de microondas. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/100413/RC453\\_Estudios\\_Calidad\\_Hornos\\_Microondas.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/100413/RC453_Estudios_Calidad_Hornos_Microondas.pdf)

Su opinión es importante para nosotros. Puede hacernos llegar comentarios, dudas y aportaciones por medio de las vías institucionales y al correo electrónico: [revista@materiales.unam.mx](mailto:revista@materiales.unam.mx)

Le haremos llegar sus preguntas a los respectivos autores. Si tiene interés en publicar con nosotros, le invitamos a conocer los lineamientos editoriales en nuestra página: <https://revista.iim.unam.mx/>



**MA** Materiales  
Avanzados