

Más allá del grafeno: La fascinante revolución de los materiales 2D y el alcance de los Mxenos

Beyond Graphene: The Fascinating Revolution of 2D Materials and the Scope of Mxenos

Suárez-Campos Guillermo^{1*}, Solís-Mosquera Jeisson Javier², Maca-Ossa Bryan², Franco-Ortiz Margarita³, Quevedo-López Manuel Ángel^{2,4}, Cabrera-Germán Dagoberto², Sotelo-Lerma Mérida^{2**}

1 Universidad de Sonora,
Departamento de Investigación en Física,
Hermosillo, Sonora, México.

2 Universidad de Sonora.
Departamento de Investigación en
Polímeros y Materiales, Hermosillo,
Sonora, México.

3 Universidad de Sonora.
Departamento de Física, Universidad
de Sonora, Hermosillo, Sonora, México

4 University of Texas.
Material Science and Engineering
Department, Dallas, Richardson, TX 75080,
United States.

*Autor de correspondencia:
guillermo.suarez@unison.mx

 orcid.org/0000-0002-9193-1710

Recibido: mayo 2025

Aceptado: junio 2025

Publicado: diciembre 2025

DOI: 10.5281/zenodo.18342059



Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND.
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

RESUMEN

Imagina un mundo donde los materiales son tan delgados que prácticamente tienen solo dos dimensiones. Este no es un concepto sacado de la ciencia ficción, sino una realidad que ha revolucionado la ciencia de los materiales en las últimas décadas. El cambio comenzó con el descubrimiento del grafeno, una capa delgadísima de unos cuantos átomos de carbono, que sorprendió al mundo por sus propiedades únicas, como la alta conductividad eléctrica y una resistencia mecánica excepcional (Asghar et al., 2023). Este hito no solo redefinió lo que los materiales pueden hacer, sino que también abrió la puerta a una nueva era de investigación en materiales bidimensionales (2D).

Sin embargo, el grafeno es solo el comienzo de una exploración mucho más amplia. Hoy en día, los científicos están desarrollando y caracterizando nuevos materiales 2D, entre los cuales destacan los MXenos, una familia de compuestos que promete transformar sectores como la electrónica, la energía, la medicina e incluso las remediaciones ambientales. Pero, ¿qué hace a los MXenos tan especiales? ¿Cómo pueden estos materiales bidimensionales cambiar la tecnología que usamos diariamente? En este artículo, exploraremos el origen y las propiedades de los materiales 2D y nos enfocaremos en los MXenos para entender cómo su estructura y funcionalidad ofrecen soluciones revolucionarias para desafíos tecnológicos actuales.

Palabras clave: biosensores flexibles, semiconductores, celdas solares, baterías

ABSTRACT

Imagine a world where materials are so thin that they practically have only two dimensions. This is not a concept from science fiction, but a reality that has revolutionized materials science in recent decades. The change began with the discovery of graphene, an ultra-thin layer of just a few carbon atoms, which astonished the world with its unique properties, such as high electrical conductivity and exceptional mechanical strength (Asghar et al., 2023). This milestone not only redefined what materials can do but also opened the door to a new era of research in two-dimensional (2D) materials.

However, graphene is just the beginning of a much broader exploration. Today, scientists are developing and characterizing new 2D materials, among which MXenes stand out, a family of compounds that promises to transform sectors such as electronics, energy, medicine, and even environmental remediations. But what makes MXenes so special? How can these two-dimensional materials change the technology we use every day? In this article, we will explore the origins and properties of 2D materials and focus on MXenes to understand how their structure and functionality offer revolutionary solutions to current technological challenges.

Introducción

Los materiales a base de carbono han sido fundamentales en el desarrollo de la sociedad moderna y juegan un rol muy importante en la evolución de la civilización humana. Uno de los aspectos fascinantes del carbono es su capacidad para formar una amplia variedad de estructuras moleculares, conocidas como alótropos, cada una con sus propiedades únicas. Entre estos alótropos se encuentran el diamante, el grafito y los fulerenos, que presentan características tan diversas que abarcan desde la dureza extrema hasta la conductividad eléctrica.

En 2004, los científicos Andre Geim y Konstantin Novoselov dieron un salto revolucionario en la ciencia de los materiales al aislar por primera vez una monocapa de átomos de carbono: el grafeno. Este material, compuesto de una única capa de átomos empaquetados en una estructura cristalina hexagonal, puede considerarse como una "hoja" individual extraída de grafito o una variación planar de los fulerenos y nanotubos de carbono. Su estructura densa y regular en forma de panal le confiere propiedades extraordinarias, como una alta resistencia mecánica y una capacidad de conductividad eléctrica y térmica sin precedentes (Glavin et al., 2020).

El descubrimiento del grafeno abrió un campo completamente nuevo en la ciencia de materiales, motivando a los investigadores a explorar sus propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas. Las aplicaciones del grafeno son amplias y abarcan desde la electrónica flexible y la microelectrónica hasta dispositivos biomédicos, sensores, almacenamiento de energía y catalizadores. Estas cualidades se deben a su alta movilidad de portadores de carga, su excelente transparencia óptica, su elevado módulo de Young y su sobresaliente conductividad térmica.

Inspirados por los avances logrados con el grafeno, los científicos comenzaron a investigar otros nanomateriales 2D ultradelgados, en busca de estructuras con propiedades similares, pero con una mayor versatilidad. Algunos de estos materiales son el nitruro de boro hexagonal (h-BN), dicalcogenuros de metales de transición (TMDs, MoS₂, MoSe₂, WSe₂), estructuras metal-orgánicas (MOFs), estructuras covalente-orgánicas (COFs), polímeros, metales, fósforos ne-

gros (BP), silicenos y, más recientemente, los MXenos (Zhang, 2015). Estos materiales, que se muestran en la Figura 1, representan la próxima generación en la investigación de materiales 2D, y muchos de ellos poseen propiedades singulares que los hacen atractivos para aplicaciones en electrónica, almacenamiento de energía y biomedicina.

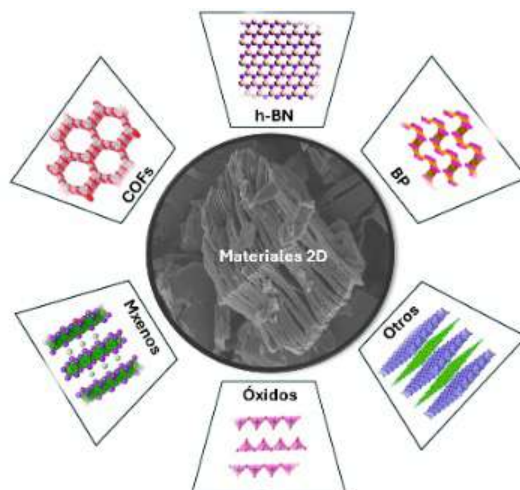


Figura 1. Diagrama ilustrativo de diferentes tipos de nanomateriales ultradelgados 2D (H. Zhang, 2015).

El origen de los materiales 2d: del grafeno a los mxenos

Como ya se mencionó anteriormente, el grafeno, un material fascinante, es considerado uno de los alótropos de carbono más importantes en la investigación científica moderna. Consiste en una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una estructura bidimensional (2D) hexagonal, donde cada átomo se enlaza covalentemente a tres átomos vecinos mediante enlaces sigma (σ), como se puede observar en la Figura 2. Esta estructura única, increíblemente delgada y resistente, le confiere propiedades excepcionales. La distancia entre dos átomos de carbono en una lámina de grafeno es de aproximadamente $1.42 \text{ \AA}$ (angströms), lo cual es solo una pequeñísima fracción del grosor de un cabello humano. Estas características estructurales permiten al grafeno exhibir propiedades como alta conductividad eléctrica y térmica, una resistencia mecánica sin precedentes y una flexibilidad asombrosa.

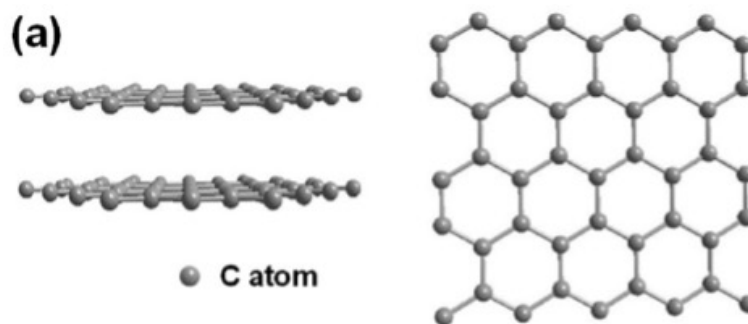


Figura 2. Estructura cristalina del grafeno.

Sin embargo, aunque el grafeno revolucionó la comprensión y las posibilidades de los materiales bidimensionales, también presentó limitaciones en términos de personalización química y algunas propiedades específicas necesarias para ciertas aplicaciones. Con el afán de sobrepasar estas limitaciones, en 2011, un equipo de investigadores de la Universidad de Drexel, descubrió una nueva familia de materiales 2D, a los cuales denominaron "MXenos". Estos materiales pertenecen a la familia de los carburos, nitruros y carbonitruros, y son producidos mediante un ataque químico controlado, conocido en el argot del procesamiento químico de materiales como grabado selectivo de fases. En este caso, partimos de una fase MAX con fórmula general $Mn+1AX_n$ (con $n = 1, 2, \text{ o } 3$), donde M representa un metal de transición (como Ti, V, Cr, Nb), A es un elemento del grupo IIIA o IVA de la tabla periódica (como Al, Si, Sn, In) y X puede ser carbono y/o nitrógeno (Tan et al., 2017). Esta fórmula permite una personalización considerable, ofreciendo una flexibilidad química única que es difícil de lograr con otros materiales 2D, incluido el grafeno.

Desde su descubrimiento, la síntesis de MXenos en multicapa ha sido posible mediante grabado químico con ácido fluorhídrico (HF), lo que permitió obtener compuestos como Ti_2CT_x , Ti_3CNT_x , Nb_2CT_x y V_2CT_x . Sin embargo, no fue hasta 2013 que se lograron aislar las hojuelas de MXene de una sola capa. Esto se consiguió mediante la intercalación de moléculas orgánicas grandes que separan las láminas entre sí, revelando la verdadera naturaleza bidimensional de estos materiales.

A partir de ese momento, los métodos de producción han evolucionado rápidamente. En 2014, se desarrolló una forma más eficiente de producir $Ti_3C_2T_x$ MXeno utilizando sales de fluoruro de amonio (NH_4HF_2), y más tarde en ese mismo año, se simplificó aún más el proceso al emplear fluoruro de litio (LiF) en combinación con ácido clorhídrico (HCl), mejorando el rendimiento de los MXenos en aplicaciones de almacenamiento de energía.

En los años siguientes, las técnicas de producción continuaron mejorando. En 2015 se introdujeron intercalantes orgánicos adicionales, como la isopropilamina y el hidróxido de tetrabutilamonio (TBAOH), lo que facilitó aún más la delaminación de los MXenos. Ese mismo año, se descubrieron dos nuevas subfamilias de MXenos, con metales de transición dobles en su estructura, ampliando la diversidad de esta familia de materiales. En 2016, se desarrolló un método llamado delaminación de capas minimamente intensiva (MILD) que permitió obtener hojuelas de MXeno más grandes y menos defectuosas sin necesidad de sonicación, lo cual incrementó su potencial de aplicación y su escalabilidad en la producción. En la figura 3 se puede apreciar una línea del tiempo progresiva de los avances en la producción de MXenos (Alhabeab et al., 2017).

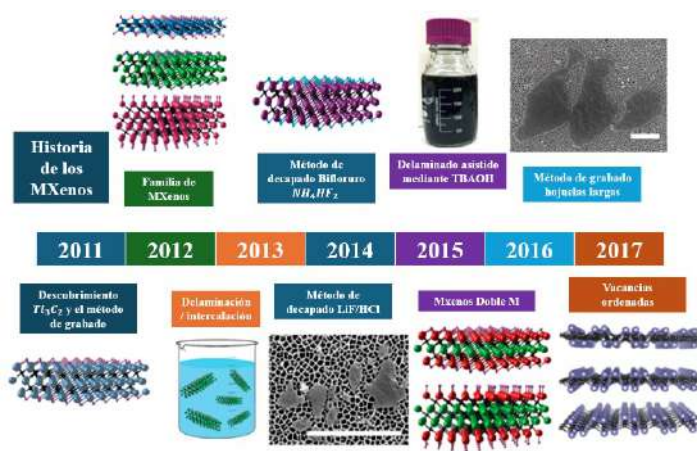


Figura 3. Línea del tiempo de los MXenos (Alhabeab et al., 2017).

Propiedades estructurales y funcionalidad de los mxenos

Las fases MAX, precursoras de los MXenos, tienen una estructura de capas hexagonales, donde las capas M están empaquetadas en una configuración hexagonal y los átomos X llenan los sitios octaédricos. El átomo A forma enlaces metálicos con el elemento M y se encuentra intercalado en las capas MX. El grabado químico de estas capas MAX, comúnmente utilizando soluciones de ácido fluorhídrico (HF), permite eliminar selectivamente la capa A para obtener los MXenos (Tan et al., 2017).

Los MXenos obtenidos mediante grabado químico suelen estar funcionalizados en su superficie con grupos -O, -F, -OH, lo cual se representa como Tx en su fórmula general $M_{n+1}AX_nTx$. Este tratamiento de superficie les confiere a los MXenos propiedades únicas, como una alta afinidad por el agua (hidrofilia) y una excelente conductividad metálica, que puede alcanzar entre 6000 y 8000 S/cm. Además, esta familia de materiales se puede encontrar en tres estructuras atómicas, las cuales van desde M_2X a M_3X_2 y M_4X_3 como se puede observar en la Figura 4, con lo cual dan la oportunidad de descubrir y modelar materiales según las demandas necesarias.

Gracias a estas propiedades excepcionales, los MXenos están siendo considerados para una amplia gama de aplicaciones innovadoras. En el almacenamiento de energía, estos materiales prometen mejorar el rendimiento de baterías y supercondensadores debido a su alta conductividad y capacidad de intercalación de iones. En el campo del tratamiento de agua, su hidrofilia y capacidad de funcionalización los convierten en candidatos potenciales para la desalinización y purificación de agua, ofreciendo soluciones más eficientes para la obtención de agua potable. Los MXenos también están demostrando ser prometedores en áreas como la catálisis química y la protección contra interferencias electromagnéticas, y en la fabricación de películas delgadas conductoras y transparentes, lo que abre la puerta a innovaciones en pantallas y dispositivos electrónicos.

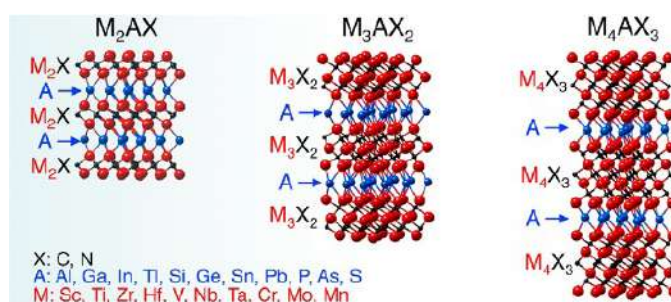


Figura 4. Estructura cristalina de la fase MAX (Y. Zhang et al., 2021).

Aplicaciones de los mxenos: innovación en acción

Los MXenos poseen propiedades increíbles que permiten ser aplicados en una gran variedad de dispositivos electrónicos, y son cada vez más relevantes en sectores como el automotriz, el biomédico y el tratamiento de agua. A continuación, se presentan algunas aplicaciones interesantes de estos materiales.

Electrónica flexible: Dispositivos que se doblan o estiran sin perder funcionalidad

Los sensores de presión flexibles han generado gran interés por su potencial en dispositivos portátiles, interfaces de interacción hombre-computadora, monitoreo médico y otros campos emergentes. La capacidad de estos sensores para doblarse o estirarse sin perder funcionalidad los convierte en una solución versátil en la tecnología portátil. Los MXenos, con su excelente conductividad y flexibilidad, son ideales para sensores piezorresistivos, que cambian su resistencia al estirarse o contraerse, lo que a su vez modifica la señal eléctrica producida.

No obstante, un desafío en el diseño de sensores piezorresistivos es encontrar un equilibrio entre el rango de detección y la sensibilidad, lo cual limita su versatilidad en algunas aplicaciones. A pesar de este reto, se han desarrollado dispositivos que pueden detectar movimientos específicos del cuerpo humano, como la flexión del codo, dedos y rodillas, así como el movimiento del cuello, la frente y hasta vibraciones en la nariz y garganta durante el habla. En la Figura 5 se muestra cómo se aplican estos sensores para monitorear diversos movimientos corporales (Wang et al., 2024).

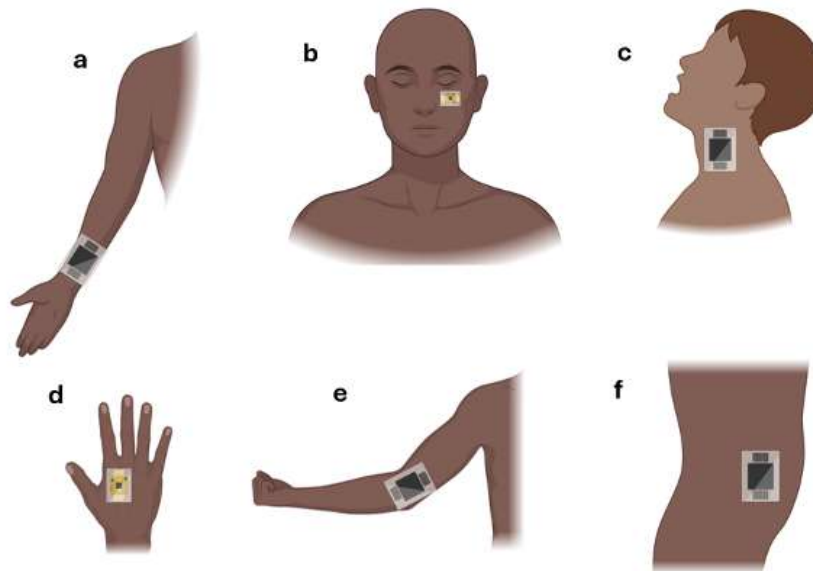


Figura 5. Aplicación de sensores flexibles para la detección de flexión de a) muñeca, b) rostro, c) movimiento del cuello, d) dedos y e) rodillas (Wang et al., 2024).

Energía: Baterías más eficientes y de mayor duración

El almacenamiento de energía es un componente esencial de la vida moderna, desde relojes hasta automóviles, ya que permite la autonomía de dispositivos sin depender de una conexión constante a la red eléctrica. Con el avance de los materiales 2D, los MXenos han demostrado tener excelentes propiedades para el almacenamiento de energía, destacando especialmente por su alta conductividad, que facilita una rápida transferencia y acumulación de carga.

Algunos dispositivos de almacenamiento de energía basados en MXenos utilizan iones de litio (Li^+). Sin embargo, debido al alto costo y a los riesgos de seguridad asociados con este tipo de iones, los investigadores están explorando alternativas con otros iones, como sodio (Na^+), magnesio (Mg^+) y aluminio (Al^+). Estos iones, además de ser más abundantes en la corteza terrestre, presentan menor costo y buena capacidad para almacenar energía, lo que convierte a los MXenos en una opción prometedora para baterías de nueva generación. En la Figura 6 se muestra un esquema representativo de un MXeno utilizado como ánodo en una batería (Wei et al., 2022).

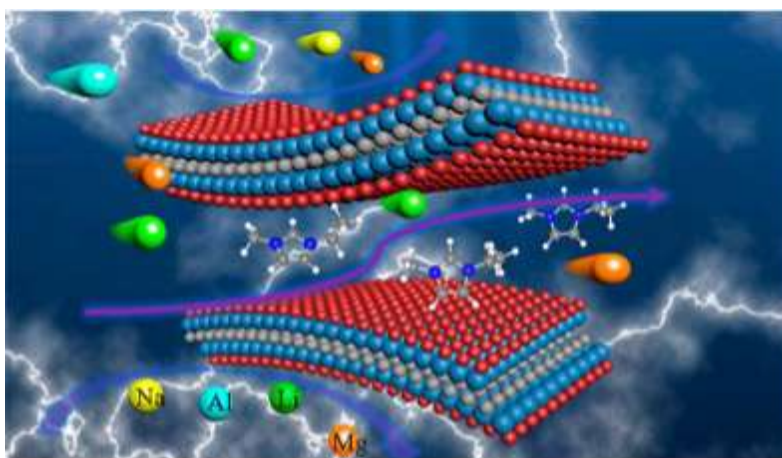


Figura 6. Esquema del MXeno como ánodos en una batería (Wei et al., 2022).

Medicina: Sensores inteligentes para monitoreo y diagnóstico

Los MXenos ofrecen un gran potencial en aplicaciones biomédicas y de biosensores, desde sistemas de liberación de fármacos y aplicaciones antimicrobianas hasta ingeniería de tejidos y sondas sensoriales. Su naturaleza hidrofílica y la diversidad de grupos funcionales en su superficie les proporcionan una ventaja sobre otras nanopartículas hidrofóbicas, que a menudo requieren modificaciones superficiales complejas para aplicaciones biomédicas. Como material 2D emergente, los MXenos tienen la capacidad de combinarse con otros materiales (como materiales 1D y nanopartículas) para generar dispositivos multifuncionales que amplían el horizonte de aplicaciones en la salud.

Los dispositivos inteligentes basados en MXenos están siendo investigados para aplicaciones de monitoreo de salud, acondicionamiento físico, análisis de señales electromiográficas (EMG) y seguimiento de movimiento humano. Gracias a su delgadez extrema, transparencia y resistencia mecánica, los MXenos pueden integrarse en textiles mediante técnicas de impresión, hilado, recubrimiento por inmersión o pulverización. Esto permite la creación de prendas especializadas que incorporan estos sensores, haciendo posible el monitoreo continuo de la salud y del estado físico.

Un ejemplo destacado de un dispositivo inteligente basado en MXenos es un sensor de sudor, que utiliza un electrodo compuesto de MXeno y azul de Prusia en un diseño modular único. Este sensor permite detectar glucosa y lactato en el sudor, proporcionando datos valiosos para el monitoreo de la salud. En la Figura 7 se muestran diversos dispositivos inteligentes elaborados a partir de MXenos, incluyendo un sistema portátil de análisis de sudor, parches sensores conectados a analizadores electroquímicos y sensores de presión transpirables y degradables (Koyappayil et al., 2022).

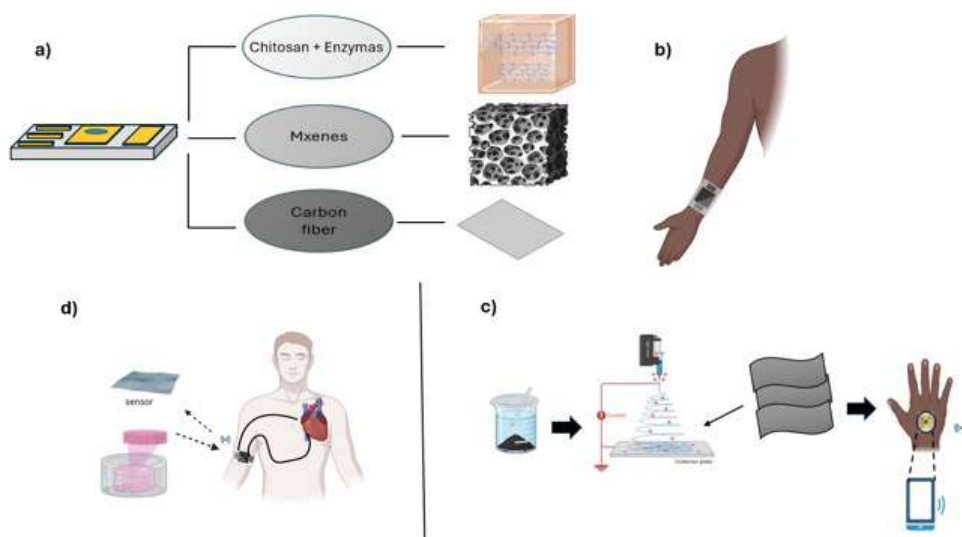


Figura 7. Esquemas de algunos sensores inteligentes a) sistema portátil de análisis de sudor, b) electrodo enzimático rico en oxígeno, c) parche sensor conectado a un analizador electroquímico portátil, d) sensor de presión transpirable y degradable (Koyappayil et al., 2022; Lei et al., 2019).

Tecnología para remediación ambiental

El rápido crecimiento de la industrialización en todo el mundo ha generado preocupaciones ambientales cada vez más serias. Uno de los principales problemas es que muchos residuos líquidos provenientes de fábricas se liberan sin tratamiento adecuado. Estos efluentes suelen contener mezclas peligrosas de colorantes tóxicos, pesticidas y metales pesados, producidos por industrias como la textil, plástica, alimentaria, farmacéutica y de curtido de cuero (Tunesi et al., 2021).

Por ello, encontrar métodos seguros, prácticos y amigables con el medio ambiente para eliminar estos contaminantes es una prioridad. Actualmente, existen varias tecnologías prometedoras, como la adsorción, la separación por membranas, la fotocatalisis y los sensores electrocatalíticos. Todas ellas buscan capturar, degradar o detectar sustancias dañinas de forma eficiente y a un costo accesible (Bury et al., 2023).

Dentro de estas alternativas, los materiales conocidos como MXenos han llamado la atención por su gran versatilidad. Como se puede apreciar en la figura 8, estos compuestos pueden eliminar diversos contaminantes presentes en el aire, el agua y el suelo. Por ejemplo, se ha demostrado que pueden capturar y transformar metales pesados como cromo (Cr^{6+}), cadmio (Cd^{2+}) y plomo (Pb^{2+}), además de radionúclidos y elementos valiosos como metales preciosos y tierras raras (Dhamodharan et al., 2024).

Asimismo, los nanocompuestos híbridos basados en MXeno son capaces de actuar frente a mezclas complejas de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos. Su eficacia incluye la degradación de colorantes, compuestos fenólicos, antibióticos, sustancias perfluoradas e incluso microplásticos. Estos resultados los posicionan como una herramienta muy prometedora para enfrentar los desafíos actuales de contaminación ambiental.

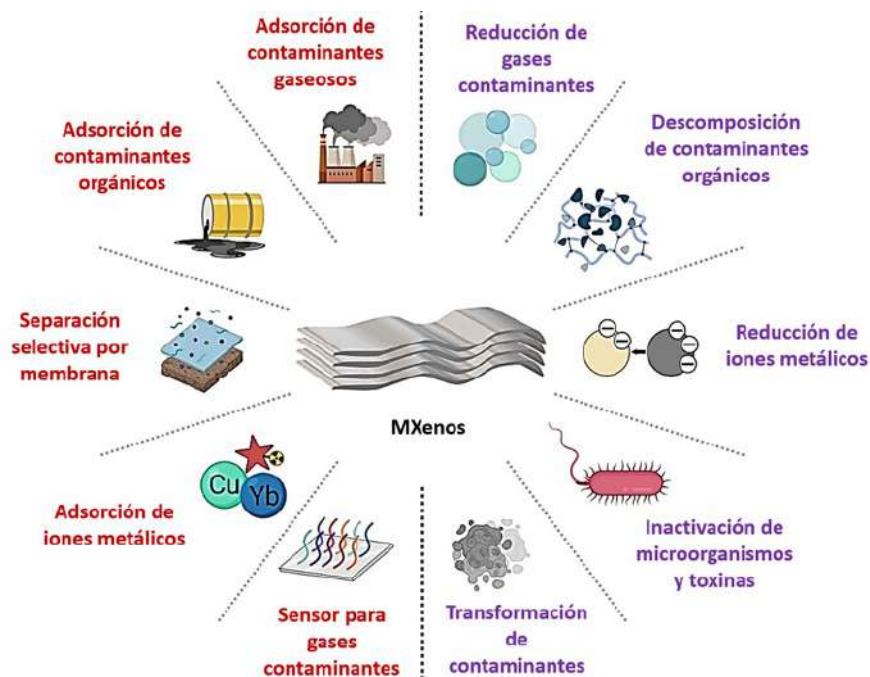


Figura 8. Esquema que ilustra el uso de los MXenos en tecnologías de remediación ambiental.

Conclusión

Desde su descubrimiento, los MXenos han capturado el interés de grandes grupos de investigación en todo el mundo, quienes han dedicado esfuerzos significativos a profundizar en sus propiedades y desarrollar métodos que faciliten su producción y aplicación. Este impulso ha permitido desentrañar características únicas de estos materiales bidimensionales, abriendo una puerta a una vasta gama de aplicaciones.

Ya sea en la electrónica rígida, donde su alta conductividad y versatilidad los hacen invaluable, o en dispositivos biomédicos flexibles, los MXenos están revolucionando múltiples sectores. Su capacidad para adaptarse a distintas necesidades tecnológicas y su potencial para mejorar la eficiencia de productos existentes sugieren que estos materiales jugarán un papel fundamental en el futuro de la ciencia y la ingeniería. A medida que los investigadores sigan explorando y optimizando sus propiedades, es probable que los MXenos impulsen innovaciones transformadoras en la tecnología y la medicina, consolidándose como uno de los materiales clave en la próxima generación de desarrollos científicos e industriales.

CONFLICTO DE INTERÉS

Todos los autores revisaron las versiones previas del manuscrito, lo leyeron y aprobaron su versión final. Asimismo, declaran no tener ningún conflicto de intereses.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por los proyectos Universidad de Sonora USO316008247 y USO316007563 y la Beca de Estancia de Investigación 2024-25, así como por el CONAHCyT Ciencia de Frontera CF-2023-I-920 y Estancias Sabáticas I1200/311/2023.

REFERENCIAS

- Alhabeb, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S., & Gogotsi, Y. (2017). Guidelines for Synthesis and Processing of Two-Dimensional Titanium Carbide (Ti₃C₂T_x MXene). *Chemistry of Materials*, 29(18), 7633–7644. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02847>
- Asghar, S., Al-Qooyim, T. M., Diarta, M. H., & Doyan, A. (2023). Graphene: The Revolutionary 2D Material. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(5), 34–38. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i5.3748>
- Bury, D., Jakubczak, M., Kumar, R., Ścieżyńska, D., Bogacki, J., Marcinowski, P., & Jastrzębska, A. M. (2023). Cleaning the environment with MXenes. In *MRS Bulletin* (Vol. 48, Issue 3, pp. 271–282). Springer Nature. <https://doi.org/10.1557/s43577-023-00507-6>
- Dhamodharan, D., Al-Harathi, M. A., Ramya, B., Bafaqeer, A., & Alam, F. (2024). MXenes: A promising material with multifunctional applications. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 12, Issue 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112316>
- Glavin, N. R., Rao, R., Varshney, V., Bianco, E., Apte, A., Roy, A., Ringe, E., & Ajayan, P. M. (2020). Emerging Applications of Elemental 2D Materials. In *Advanced Materials* (Vol. 32, Issue 7). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adma.201904302>
- Koyappayil, A., Chavan, S. G., Roh, Y. G., & Lee, M. H. (2022). Advances of MXenes; Perspectives on Biomedical Research. In *Biosensors* (Vol. 12, Issue 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/bios12070454>
- Tan, C., Cao, X., Wu, X. J., He, Q., Yang, J., Zhang, X., Chen, J., Zhao, W., Han, S., Nam, G. H., Sindoro, M., & Zhang, H. (2017). Recent Advances in Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials. In *Chemical Reviews* (Vol. 117, Issue 9, pp. 6225–6331). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00558>
- Tunesi, M. M., Soomro, R. A., Han, X., Zhu, Q., Wei, Y., & Xu, B. (2021). Application of MXenes in environmental remediation technologies. In *Nano Convergence* (Vol. 8, Issue 1). Korea Nano Technology Research Society. <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00255-w>
- Wang, L., Ning, H., Chen, S., Huang, Y., Chen, S., Wang, L., Liu, Y., Liu, H., Qiu, T., Yao, R., & Peng, J. (2024). MXene/rGO piezoresistive sensor based on Longan leaves' hierarchical microstructure for human-motion detection. *Applied Materials Today*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102474>
- Wei, C., Fang, T., Tang, X., Jiang, K., & Liu, X. (2022). Ti₂CT₂MXene as Anodes for Metal Ion Batteries: From Monolayer to Bilayer to Pillar Structure. *Langmuir*, 38(38), 11732–11742. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c01877>
- Zhang, H. (2015). Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials. *ACS Nano*, 9(10), 9451–9469. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b05040>

