



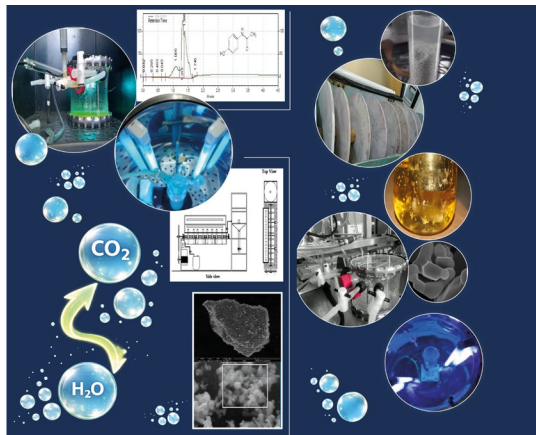
UNACAR®
Universidad Autónoma del Carmen
"Por la Grandeza de México"

Acalán Revista de la Universidad Autónoma del Carmen

Julio - Diciembre
2025

Número 121
Edición Especial Parte 1

ISSN 2594 1658



Diseño de portada realizada con fotografías autorizadas por los autores de los artículos contenidos en esta edición especial.

Dr. Carlos Montalvo Romero
Coordinador de la Edición Especial Vol. 1

Acalán Revista de la Universidad Autónoma del Carmen No. 121, Julio - Diciembre 2025, edición especial Vol. 1. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Carmen, a través de la Dirección General de Extensión Universitaria, por el Departamento de Fomento Editorial, Av. 56 No. 4 Col. Benito Juárez. C.P. 24180 Ciudad del Carmen, Campeche, teléfono 9383811018, www.unacar.mx. Editor responsable LDG. Ana Isabel Polkey Gómez, Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2015-042113060500-203. ISSN 2594-1658. Responsable de la última actualización de este número, Coordinación de Tecnologías de la Información y la Comunicación UNACAR, Maestro Raúl Arturo Peralta. Calle 56 número 4, esquina avenida Concordia. Col. Benito Juárez. C.P. 24180. Ciudad del Carmen, Campeche. Fecha de última modificación, 13 de febrero del 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma del Carmen.

Dra. Sandra Martha Laffon Leal
Rectora

Lic. Javier Zamora Hernández
Secretario General

Dra. Heidi Angélica Salinas Padilla
Secretaría Académica

Mtro. Joel Adir Acuña Gálvez
Director General de
Extensión Universitaria

Mtra. Yuridia Raquel Velasco Sosa
Directora de Difusión Cultural

LDG. Ana Isabel Polkey Gómez
apolkey@delfin.unacar.mx
Jefa de Fomento Editorial
Editor responsable
Diagramación

Dr. Ricardo Armando Barrera Cámara
Facultad de Ciencias de la Información

MMI. Rafael Ferrer Méndez
Facultad de Ciencias Educativas

Dra. Myrna Delfina López Noriega
Facultad de Ciencias Económicas
Administrativas

Dra. Lucely Maas Góngora
Facultad de Ciencias de la Salud

Dr. Carlos Montalvo Romero
Facultad de Química

Dr. Leonardo Palemón Arcos
Facultad de Ingeniería

Dra. María Elena Reyes Monjaras
Facultad de Derecho

Representantes Invitados

Dra. Ana Alberta Canepa Saénz
Facultad de Ciencias de la Información

Dra. Angélica Gabriela Vital Ocampo
Facultad de Química

Directorio

Comité Editorial

5.- Fotocatálisis con ZnO: ventajas, dopaje y aplicaciones futuras

Montalvo Romero Carlos
Zermeño Reséndiz Brenda
Aguilar Ucán Claudia
Montalvo Daniel
Ruiz Marín Alejandro

21.- Eliminación del acetaminofén en solución acuosa por fotocatálisis: Una breve revisión

Aguilar Ucán Claudia
Montalvo Romero Carlos
Abatal Mohamed
Arias Mateo María Cruz

30.- Análisis del desempeño mecánico de bloques compuestos con fibras de *Parmentiera edulis* (cuajilote) para aplicaciones en bioconstrucción

Muñoz Talango Dayana Guadalupe
Abatal Mohamed
Santiago de la Cruz Arlette Arizbe

39.- Catalizadores obtenidos por síntesis verde: aplicaciones en fotocatálisis. Una breve revisión

Arias Mateo María Cruz
Aguilar Ucán Claudia Alejandra
Montalvo Romero Carlos
Rodas Hernández José Eduardo

48.- Degradación fotocatalítica de diclofenaco en presencia de luz UV, H_2O_2 y TiO_2

Luna Sánchez Raúl A.
Solís Maldonado Carolina
Ortiz Silos Nayeli
Cristóbal Salas Alfredo
Hernández Salazar José M.
López Barragán Mariana Alejandra

59.-

Síntesis verde del ZnO en aplicaciones fotocatalíticas

Montalvo Romero Carlos
Oros Ruiz Socorro
Zermeño Reséndiz Brenda
Jacobó Azura Aracely
Ginés Palestino Ruby

72.-

Sinergia catalítica en superficie: Triplete $\text{Ti}^{3+}/\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ en Co/TiO_2 como clave para la producción fotocatalítica de alcoholes a partir de CO_2

Montalvo Daniel
Pérez Francisco José Mauel
Cruz Valdez Jesús Alonso
Jiménez Castillo Ulises
Ginés Ruby
Montalvo Carlos

78.-

Uso de la zeolita natural para el ablandamiento del agua potable en el municipio del Carmen

Gutiérrez Laffon Yazmin Michelle
Abatal Mohamed
Anguebes Franseschi Francisco
De la Cruz Hernández Rocío
Aguilar Ucán Claudia Alejandra

87.-

Degradación fotocatalítica de antiinflamatorios no esteroideos

Zermeño Reséndiz Brenda Berenice
Castro Alonso Juan Martín
González Pereyra Daniela
Aguilar Ucán Claudia
Moctezuma Edgar

Estimados lectores, Nos complace presentar la edición especial de Acalán, dedicada a un tema de vital importancia en el ámbito de la ciencia y la tecnología contemporánea: la adsorción y la fotocatalisis. Este número reúne una valiosa colección de investigaciones de destacados académicos y científicos que están realizando significativos aportes en estas áreas, demostrando la relevancia y la innovación que estos fenómenos presentan en la actualidad.

La colaboración en esta edición proviene de diversas instituciones de renombre, incluyendo la Universidad Autónoma de Guanajuato, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la Universidad Veracruzana (con aportaciones de sus campus en Poza Rica, Minatitlán y Orizaba), así como de la Universidad Autónoma del Carmen, aportaciones de las facultades de Química e Ingeniería.

Esta diversidad de trabajos no solo enriquece el contenido, sino que también refleja la sinergia que se está construyendo entre distintas casas de estudio, un aspecto fundamental para el avance del conocimiento científico. En estas páginas, los lectores encontrarán una representación integral de los trabajos más recientes relacionados con las líneas de investigación en adsorción y fotocatalisis, campos que han cobrado un papel preponderante en la búsqueda de soluciones para problemáticas ambientales y energéticas.

Esta edición no solo documenta el progreso alcanzado en este 2025, sino que también plantea nuevos horizontes y desafíos para futuras investigaciones. Desde la remediación de contaminantes hasta la conversión de la energía solar en fuentes utilizables, la adsorción y la fotocatalisis emergen como herramientas clave en la búsqueda de un desarrollo sostenible.

Creemos firmemente que los artículos aquí presentados inspirarán a investigadores, estudiantes y profesionales a explorar nuevas posibilidades y a continuar avanzando en el entendimiento y la aplicación de estos fenómenos.

Agradecemos a todos los colaboradores que hicieron posible esta edición especial y esperamos que este esfuerzo conjunto contribuya a fortalecer la comunidad científica y fomente el diálogo sobre estos temas tan relevantes. Les invitamos a sumergirse en la lectura y a compartir sus impresiones.

Atentamente,

Dr. Carlos Montalvo Romero
Profesor investigador PTC
Facultad de Química de la
Universidad Autónoma del Carmen

Fotocatálisis con ZnO: ventajas, dopaje y aplicaciones futuras

Montalvo Romero Carlos^{(1)*}

Zermeño Reséndiz Brenda⁽²⁾

Aguilar Ucán Claudia⁽¹⁾

Montalvo Daniel⁽³⁾

Ruiz Marín Alejandro⁽¹⁾

RESUMEN

Uno de los materiales de más bajo costo que podemos utilizar en fotocatálisis es el óxido de zinc, este catalizador tiene un rendimiento fotocatalítico alto, una excelente estabilidad física y biocompatibilidad, esta revisión resume las ventajas, su preparación y sus aplicaciones en fotocatálisis y en otros procesos. Se revisan diversas estrategias de modificación del ZnO que han sido implementadas por investigadores para mejorar sus características. Entre estas estrategias se encuentran el dopaje con no metales y metales, la deposición de metales nobles, así como la combinación con otros semiconductores. Estas técnicas tienen como objetivo optimizar las propiedades del ZnO para adaptarlo a diferentes aplicaciones tecnológicas y científicas.

Además de las modificaciones en la estructura del ZnO, se han explorado sus aplicaciones como compuestos fotocatalíticos. En los últimos cinco años, se ha destacado el uso del ZnO en biomedicina, donde ha demostrado propiedades antibacterianas, anticancerígenas y capacidades de biodetección. La capacidad del ZnO para descomponer contaminantes y su uso en tratamientos de aguas residuales también han sido áreas de enfoque significativo, mostrando el potencial del material para abordar problemas ambientales relevantes.

Palabras clave

ZnO, dopaje, fotocatálisis, mecanismo, foto degradación.

Abstract

Zinc oxide is one of the lowest-cost materials we can use in photocatalysis. This catalyst has high photocatalytic performance, excellent physical stability, and biocompatibility. This review summarizes its advantages, its preparation, and its applications in photocatalysis and other processes. Various ZnO modification strategies that have been implemented by researchers to improve its characteristics are reviewed. These strategies include doping with nonmetals and metals, deposition of noble metals, and combinations with other semiconductors. These techniques aim to optimize ZnO's properties to adapt it to different technological and scientific applications.

In addition to modifications to ZnO's structure, its applications as photocatalytic compounds have been explored. In the last five years, the use of ZnO in biomedicine has gained prominence, where it has demonstrated antibacterial, anticancer, and biosensing capabilities. ZnO's ability to decompose

^{(1)*} Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, calle 56 no. 4 Esq. Av. Concordia, Col. Benito Juárez C.P. 24180, Cd. del Carmen Campeche, México. ⁽²⁾ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Dr. Manuel Nava 6, Zona Universitaria, C.P. 78280, San Luis Potosí, México. ⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km 16.5, Coatzacoalcos, Veracruz, 96535, México.

pollutants and its use in wastewater treatment have also been areas of significant focus, demonstrating the material's potential to address relevant environmental issues.

Keywords

ZnO, doping, photocatalysis, mechanism, photodegradation.

1. Introducción

El óxido de zinc (ZnO) es un material semiconductor con una amplia banda prohibida, típicamente alrededor de 3,37 eV, y una alta energía de enlace de excitones de casi 60 meV. Estas propiedades lo hacen adecuado para diversas aplicaciones, como la optoelectrónica y la fotocatálisis.

Estudios recientes se han centrado en modificar las características estructurales y electrónicas del ZnO para mejorar su rendimiento en estas áreas. Un enfoque consiste en dopar el ZnO con metales de transición para alterar sus propiedades eléctricas y magnéticas. Por ejemplo, se ha demostrado que la implantación de iones de titanio en películas de ZnO adapta sus propiedades de transporte eléctrico y magnetoeléctrico, mejorando potencialmente su idoneidad para dispositivos electrónicos (Pal et al., 2024).

Gracias a su excelente capacidad de oxidación, tamaño ajustable, alta estabilidad química, baja toxicidad y sencilla preparación, el óxido de zinc semiconductor tipo n (ZnO) ha demostrado un gran potencial como fotocatalizador eficiente, especialmente en la degradación de contaminantes orgánicos, la eliminación de bacterias y aplicaciones en componentes electrónicos (Velásquez y Romero, 2022, Ramírez y Salinas 2021, Espinosa y Correa 2020, López y Pérez 2020).

El óxido de Zinc (ZnO) ha sido objeto de numerosas investigaciones en los últimos años debido a sus propiedades únicas y su versatilidad en aplicaciones prácticas. En este contexto, se revisan diversas estrategias de modificación del ZnO que han sido implementadas por investigadores para mejorar sus características. Entre estas estrategias se encuentran el dopaje con no metales y metales, la deposición de metales nobles, así como la combinación con otros semiconductores. Estas técnicas tienen como objetivo optimizar las propiedades del ZnO para adaptarlo a diferentes aplicaciones tecnológicas y científicas.

Además de las modificaciones en la estructura

del ZnO, se han explorado sus aplicaciones como compuestos fotocatalíticos. En los últimos cinco años, se ha destacado el uso del ZnO en biomedicina, donde ha demostrado propiedades antibacterianas, anticancerígenas y capacidades de biodetección. La capacidad del ZnO para descomponer contaminantes y su uso en tratamientos de aguas residuales también han sido áreas de enfoque significativo, mostrando el potencial del material para abordar problemas ambientales relevantes. Las aplicaciones de ZnO no se limitan solo a la biomedicina y la contaminación ambiental. Se han identificado otras áreas de interés en las que los compuestos a base de ZnO están empezando a jugar un papel crucial. Estos incluyen su uso en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, sensores y en la industria del revestimiento, lo que resalta su versatilidad en diversos sectores industriales.

La multifuncionalidad del ZnO lo convierte en un material primordial en la investigación actual y futura. Sin embargo, a pesar de los prometedores avances, el desarrollo de compuestos a base de ZnO también enfrenta retos significativos. Entre estos se incluyen la estabilidad a largo plazo de los compuestos modificados, la escalabilidad de sus aplicaciones y la necesidad de una mayor comprensión de los mecanismos subyacentes que rigen su conducta en diferentes entornos. Además, la búsqueda de alternativas sostenibles para su producción y modificación estiliza un importante desafío.

La modificación del ZnO y sus aplicaciones han mostrado un crecimiento significativo en los últimos años, con un enfoque particular en los campos de biomedicina y medio ambiente. Sin embargo, para maximizar su potencial, es fundamental abordar los retos asociados con su desarrollo y búsqueda de soluciones innovadoras. De continuar este camino, el ZnO podría convertirse en un componente indispensable en varias industrias, impulsando avances tecnológicos y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Las estrategias reportadas para mejorar la actividad catalítica del ZnO incluyen el control de la morfología, el dopaje iónico, el acoplamiento de semiconductores y la deposición de metales nobles en la superficie. Sin embargo, estos enfoques a menudo presentan inconvenientes, como los complejos procesos de preparación y la necesidad de equipos especializados como lámparas de xenón o microondas durante la catálisis (Gómez y Martínez 2021, Fernández y Silva 2022, Torres y Martínez 2023, Salgad y Ortega, 2023). El ZnO es un excelente fotocatalizador debido a su alta movilidad

electrónica y su rápida tasa de transferencia de electrones fotogenerados. Sin embargo, su amplia banda prohibida restringe la absorción de luz.

2. Mecanismo fotocatalítico del ZnO

Los fotocatalizadores en los últimos años, han ganado reconocimiento como catalizadores verdes estándar debido a su naturaleza no tóxica y compatibilidad ambiental. Estos son materiales semiconductores que inician y aceleran reacciones químicas cuando se exponen a la luz.

Al exponerse a la luz, se puede generar un par electrón-hueco dentro del material semiconductor. Algunos de estos materiales son el TiO_2 , ZnO , óxido férrico (III) (Fe_2O_3), zirconia (ZrO_3), óxido de vanadio (V_2O_5), pentóxido de niobio (Nb_2O_5) y trióxido de tungsteno (WO_3) (Lu et al., 2022, Ghamarpoor et al., 2024, Arzaee et al., 2023, Ola et al., 2023). Dentro de estos catalizadores el más utilizado es el TiO_2 por sus propiedades físicas, seguido de este catalizador está el ZnO , el cual está siendo utilizado en estos últimos años por su bajo costo y por qué tienen grandes propiedades estructurales. (Ola et al., 2023, Armaković et al., 2022).

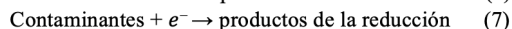
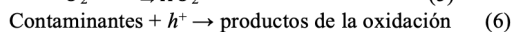
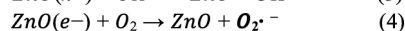
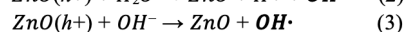
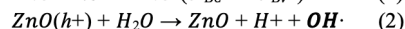
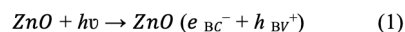
Cuando el ZnO se expone a la luz con una energía fotónica superior a su energía de banda prohibida, los electrones de la banda de valencia (BV) se transfieren a la banda de conducción (BC), creando pares de electrón / hueco (e^-/h^+). Estos pares e^-/h^+ viajan entonces a la superficie del ZnO y participan en reacciones redox. El h^+ se combina con agua e iones hidróxido para crear radicales hidroxilos. Mientras que el e^- se combina con oxígeno para crear aniones radicales superóxido o H_2O_2 (Chakravorty et al., 2024) Cuando las especies activas generadas encuentran contaminantes orgánicos, estos se degradan en CO_2 y H_2O a través de una reacción redox. Estos pasos se pueden resumir en:

(i) inicialmente, los contaminantes se dispersan desde la fase líquida hasta la superficie exterior del ZnO , donde se produce la adsorción;

(ii) durante el proceso de adsorción, se producen reacciones redox seguidas de la desorción de los productos; y

(iii) finalmente, los productos contaminados se eliminan de la interfaz.

Este paso se puede representar mediante reacciones químicas que se presentan a continuación.



Sin embargo, las reacciones fotocatalizadoras son posibles gracias a la posición de la banda de energía del ZnO y a los potenciales redox de los adsorbatos. En el mecanismo de reducción, el potencial redox del adsorbato se encuentra por debajo de la banda de conducción del ZnO , lo que provoca la transferencia de electrones excitados desde la banda de conducción a la partícula adsorbida (Mohamed. et., 2023, Jiang et al., 2022).

En el mecanismo de oxidación, el potencial redox del adsorbato se encuentra por encima de la banda de valencia del ZnO , cediendo un electrón al hueco vacío en dicha banda.

La ecuación anterior concluyó que los potentes agentes reductores que pueden iniciar la degradación de contaminantes mediante el proceso de reducción son los electrones fotoinducidos. Por otro lado, los huecos fotoinducidos son los agentes oxidantes fuertes que pueden atacar rápidamente a los contaminantes orgánicos y oxidarlos para iniciar el proceso de degradación.

El oxígeno disuelto puede ser reducido indirectamente por los electrones fotoinducidos para producir radicales superóxido, altamente reactivos. Mientras tanto, los huecos fotoinducidos pueden atacar moléculas de agua o aniones hidroxilo para producir radicales hidroxilos, que actúan como potentes agentes de oxidación. Estos radicales atacan moléculas orgánicas potentes y las fotodegradan en dióxido de carbono, agua y otras especies inorgánicas o intermediarios inofensivos (Mehrali-Afjani et al., 2020, Yousefi et al., 2021, Mehrabad et al., 2019, Rostami-Vartooni et al., 2019, Pouretedal et al., 2017).

El fotocatalizador de ZnO se activa con luz ultravioleta debido a su amplio intervalo de banda de 3,37 eV ($\lambda = 368 \text{ nm}$) (Hassan et al., 2012, Gavade et al., 2021). El ZnO activado con luz visible ha atraído mucha atención debido a que el espectro de luz solar incluye solo un 5% de luz ultravioleta, y la iluminación artificial de interiores también emite luz visible. Por lo tanto, para lograr una alta tasa

de fotocatalisis y superar todos los desafíos bajo la irradiación de luz visible, la nanoestructura de ZnO se ha modificado mediante dopaje con metales alcalinotérreos como Mg (Elhalil et al., 2018, Kadhim et al., 2021) o dopaje con nanopartículas de metales de transición como Fe (Bousslama et al., 2017).

Además, se utilizan nanopartículas de metales nobles como Ag y Au (Mehrali-Afjani et al., 2020, Yousefi et al., 2021,), así como no metales como azufre (S) y carbono (C) (Dib et al., 2020), (Sanakousa et al., 2022) para modificar el ZnO y que funcione como fotocatalizador bajo la irradiación de luz visible.

3. Modificación del ZnO

3.1 Dopaje con metales, metales nobles y no metales.

El ZnO se considera generalmente uno de los fotocatalizadores más prometedores debido a su naturaleza no tóxica y su estabilidad física.

Unos de los problemas del catalizador de ZnO es que solo es activo bajo radiación UV debido a su alta brecha de banda. Dado que la luz solar se compone de tan solo un 5%–7% de luz UV, el bajo aprovechamiento de la energía solar por parte de los catalizadores de ZnO limita considerablemente su aplicación a gran escala.

Además, la recombinación de pares e^-/h^+ fotogenerados en ZnO es muy alta, lo que resulta

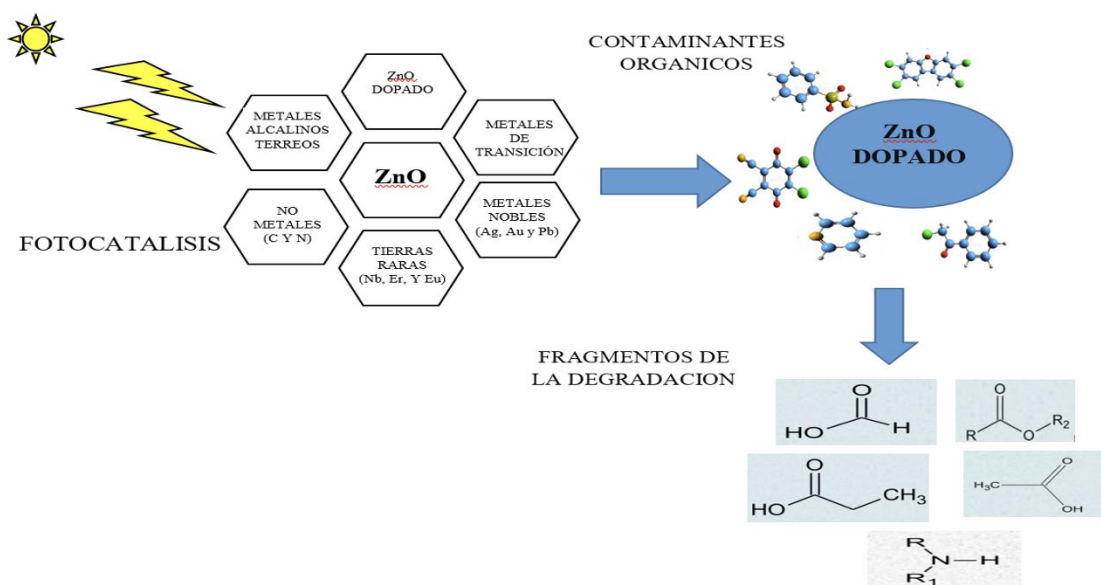
en una baja eficiencia cuántica que reduce considerablemente la actividad fotocatalítica.

Por lo tanto, se requiere que se activó a la luz visible y mejorar la eficiencia de separación de los pares e^-/h^+ fotogenerados de los fotocatalizadores basados en ZnO. El dopaje de iones de metales de transición en la red cristalina de ZnO es una buena técnica para mejorar su actividad fotocatalítica, ya que los metales dopantes crean nuevos niveles de energía en el ancho de banda que mejoran principalmente la eficiencia de separación de carga de e^-/h^+ mediante la formación de trampas de electrones. Por ejemplo, Kaneva et al., (2010) han confirmado que las películas de ZnO dopadas con Ni exhibieron un mejor rendimiento fotocatalítico en luz visible para la degradación del verde malaquita en comparación con el ZnO sin dopar (Rodríguez y Huertas, 2019; Castro y Medina, 2018).

El óxido de zinc ha sido dopado con diferentes metales (figura 1) como: Pt, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Au, y Cu., muchas de las veces se ha encontrado que la estructura cristalina del ZnO mantuvo su estructura de wurtzita incluso tras el dopado con metales de transición, y el ZnO dopado mostró una mayor absorción de la luz visible. Bajo la irradiación solar simulada, todos los fotocatalizadores de ZnO dopados con metales de transición han demostrado un mejor rendimiento en las reacciones de fotodegradación (Qui et al., 2020).

Para que una reacción de fotocátalisis sea eficiente, la recombinación electrón-hueco inducida por fotones debe disminuir, y los pares deben migrar

Figura 1. Dopaje del ZnO con diferentes materiales (figura propia)



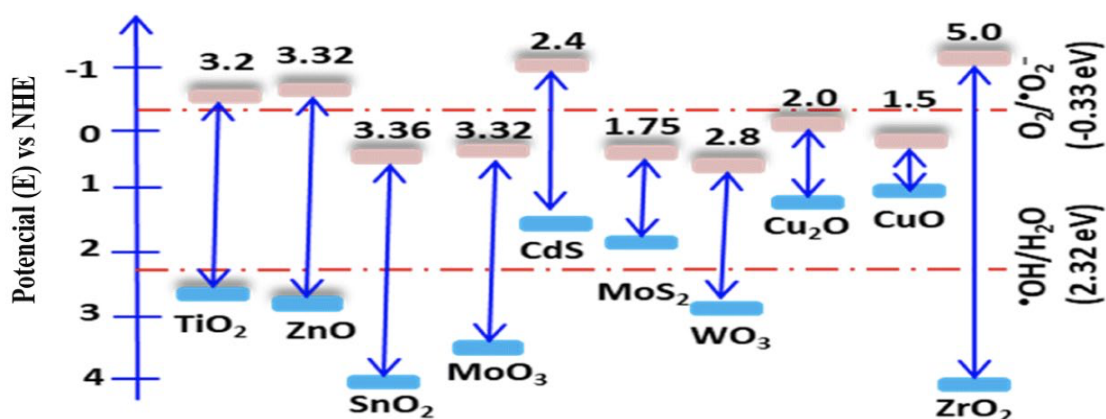
a la superficie y reaccionar con las moléculas contaminantes absorbidas en ellas. Además, para estas reacciones superficiales, la posición del borde de la banda del catalizador en relación con el potencial redox de oxidación y reducción es un factor crítico.

Los bordes de la banda de valencia (VB) y la banda de conducción (CB) del catalizador deben tener un potencial más positivo y negativo que el potencial redox del agua y el oxígeno, respectivamente (Figura 2). La wurtzita ZnO, con una amplia brecha de banda de 3,23 eV, posee excelentes propiedades

optoelectrónicas y piezoelectricas. Su estructura cristalina hexagonal tiene parámetros de red de $a = 0,3296 \text{ nm}$ y $c = 0,520 \text{ nm}$, y pertenece al grupo espacial P63mc (Hermann-Mauguin) o C46v (notación de Schoenflies).

El ZnO tiene un potencial CB de $-0,5 \text{ V}$ y un potencial VB de $+2,7 \text{ V}$ frente a un electrodo de hidrógeno estándar (NHE). El potencial CB es más negativo que el potencial redox de reducción de O_2/O_2^- ($-0,33 \text{ V}$), mientras que el potencial VB es más positivo que el potencial redox de oxidación de $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ (como se muestra en la figura 2). Por lo

Figura 2. Ancho de banda prohibidos de diferentes semiconductores y metales (Qui et al., 2020).



tanto, el O_2 y el H_2O pueden reducirse y oxidarse fácilmente en presencia de electrones y huecos.

Entre las nanopartículas de ZnO dopadas, las nanopartículas de óxido de zinc dopadas con Cobalto producidas por Jacob et al., (2017) muestran la absorción de luz visible más favorable. El dopaje con cobalto muestra nuevos picos en las regiones de 563, 610 y 657 nm, lo cual se correlaciona con las transiciones d-d de los iones Co^{2+} en coordinación tetraédrica. Debido a estos picos, se observó la mayor absorción de luz visible en la muestra dopada al 2%.

Las mayores concentraciones de dopaje de Co comenzaron a causar una reducción general de la absorción en todas las longitudes de onda, aunque la absorción en la región UV se mantuvo sin cambios con respecto a la del ZnO sin dopar. De igual manera, la banda prohibida disminuyó inicialmente después del co-dopaje al 1% y al 2%, pero volvió a aumentar en muestras con altos niveles de Co (3% y 4%). Los estudios de eficiencia cuántica y fotocorriente también mostraron un patrón similar de crecimiento

y disminución con el porcentaje de dopaje. Bajo los diversos láseres de luz visible empleados, la muestra de óxido de zinc dopado con Co al 2% mostró el mejor rendimiento de fotocorriente.

Las nanopartículas de ZnO dopadas con Mn parecen ligeramente más pequeñas que sus contrapartes sin dopar, lo que se debe principalmente a la inhibición del crecimiento por la presencia de iones dopantes en el medio de reacción. De igual manera, Ullah et al., (2008) cohidrolizaron acetatos de zinc y magnesio para producir nanopartículas de óxido de zinc dopadas con magnesio. Ambos grupos utilizaron soluciones alcohólicas para evitar la formación de ZnOH.

Los iones Mn^{2+} actúan inicialmente como centros de captura de electrones, reduciendo la recombinación y mejorando la transferencia de carga interfacial. Según la investigación de Ullah et al., (2008), las nanopartículas de óxido de zinc dopado con Mn^{2+} exhiben una absorción general significativamente mayor que el óxido de zinc sin dopar, con una

absorción que se extiende hasta el espectro visible de hasta 650 nm. Su investigación sugirió que el ZnO dopado con Mn absorbe más luz visible que el ZnO dopado con Al y Cu, lo que puede atribuirse a la mayor densidad de defectos del material.

Las nanopartículas de ZnO dopado tuvieron un rendimiento inferior al de las nanopartículas de ZnO sin dopar cuando se utilizaron para la degradación fotocatalítica de colorantes en la región UV, pero su rendimiento fue 50 veces superior bajo luz visible.

Mediante la hidrolización del acetato de zinc en presencia de cloruro de cobalto, Nigussie et al., (2018) prepararon nanopartículas de ZnO dopadas con Ag mediante la técnica sol-gel utilizando nitrato de plata y nitrato de zinc. Rathika et al., (2022) sintetizaron Nanopartículas de ZnO/Ag sintetizadas mediante combustión utilizando nitrato de zinc, glicina y ácido cítrico como materiales pioneros, y nitrato de plata como fuente de dopaje. Las nanopartículas sintetizadas presentan la típica estructura hexagonal de zincita y un tamaño cristalino promedio de 74 nm.

3.2 Dopaje con no metales.

Algunos de los no metales que se han reportado que se han utilizado para dopar al ZnO son: Nitrógeno, azufre, fósforo, Carbono.

La síntesis de nanopartículas uniformes de ZnO dopadas con nitrógeno es bastante compleja. Se observa que la mayoría de los informes de investigación sobre ZnO dopado con nitrógeno incluyen películas en lugar de nanopartículas coloidales (Sun et al., 2023). Existen muy pocos informes que revelen la capacidad de formar nanopartículas de ZnO dopadas con nitrógeno no agregadas (Mehrabad et al., 2019, Rostami-Vartooni et al., 2019, Pouretedal et al., 201, Majumder et al., 2020, Gavade et al., 2020).

Macías-Sánchez et al., (2015) mezclaron los precursores acetato de zinc y urea junto con hidróxido de amonio como fuente de nitrógeno para producir nanopartículas de óxido de zinc dopadas con nitrógeno. Mediante un calentamiento adicional a 400 °C durante 5 h en presencia de aire, se produjo un conjunto mixto de nanobarras y nanoesferas de óxido de zinc dopado con nitrógeno con un tamaño promedio de entre 80 y 100 nm. El dopaje con nitrógeno reduce el tamaño de los cristallitos, lo que sugiere un aumento de la deformación reticular.

Zhang et al., (2015) obtuvieron un resultado equivalente utilizando una técnica similar que

implicaba dopaje con carbono en lugar de nitrógeno. Se produjeron nanopartículas de óxido de zinc dopado con C moliendo acetato de zinc con urea en un mortero y luego recociendo a 450°C. Las partículas de óxido de zinc puro muestran morfología de nanobarras, pero después del dopaje con C, el tamaño disminuye lentamente para producir nanoesferas para muestras dopadas con C hasta un 50 % en peso. Se observa que el tamaño de los cristallitos, de casi 50 nm, se mantuvo proporcionalmente constante hasta un 20 % de dopaje con C; sin embargo, se observó una disminución constante de 33 nm a 12 nm para muestras dopadas al 30 % y al 40 %, respectivamente. Esta técnica también es válida para la síntesis industrial a gran escala.

El ZnO dopado con S, con estructura de wurtzita hexagonal, se puede sintetizar eficientemente mediante un método mecanoquímico seguido de un método hidrotermal (Patil et al., 2010). En el ZnO codopado con Ag/S producido hidrotermalmente, se observó que la plata actúa como un buen sustituto y reduce la generación de vacantes intersticiales de Zn y O, mientras que el azufre aumenta la solubilidad de la plata en las muestras codopadas (Patil et al., 2023).

Es evidente que el cambio en la concentración molar de dopantes influye tanto en la formación del producto como en la estructura de las nanopartículas. La estructura de wurtzita hexagonal de ZnO se observa solo con un menor contenido de S, mientras que con un mayor contenido de S se obtiene una mezcla de ZnS, S, $\text{Zn}_2(\text{OH})_2\text{SO}_4$, ZnSO_3 y ZnSO_4 . La concentración de azufre no solo influye en la estructura y la fase, sino que también influye notablemente en el tamaño del cristal y la tensión reticular (Patil et al., 2023).

En consecuencia, el tamaño del cristallito disminuye y la tensión reticular aumenta primero y luego disminuye a medida que el contenido de S aumenta continuamente (Xie et al., 2015, Yang et al., 2017, Babikier et al., 2014).

Al dopar óxido de zinc con fósforo con diferentes concentraciones de fósforo mediante la técnica sol-gel, el acetato de zinc deshidratado se funde en metanol con agitación continua durante 10 minutos a temperatura ambiente. Se añadió el precursor dopante P, como el fosfato disódico de amonio, en diversas concentraciones, del 0 al 5 %, con agitación magnética continua, hasta su completa disolución. El ZnO dopado con P presenta una estructura de wurtzita hexagonal policristalina con un tamaño de cristallito variable, entre 22 y 40 nm, con diferentes concentraciones de dopaje (Patil et al., 2023).

3.3 Dopaje con tierras raras.

Los elementos de tierras raras (ETR) contienen diecisiete elementos, quince elementos lantánidos, escandio (Sc) e itrio (Y), que muestran un comportamiento químico similar. Los iones lantánidos son notablemente estables debido al efecto protector de sus capas electrónicas externas, $5p^2$ y $5p^6$, llenas. Las transiciones electrónicas dentro de los orbitales 4f de los iones lantánidos pueden resultar en transiciones ópticas que abarcan todo el espectro solar. Esta disposición distintiva de electrones y niveles de energía separados, característicos de los iones de metales ETR, permite la emisión de luz ultravioleta (UV) o visible cuando absorben fotones del infrarrojo cercano. Como dopaje, los metales ETR pueden convertirse en impurezas en la red cristalina del semiconductor para obtener nuevas propiedades.

Recientemente, los semiconductores dopados con metales ETR se han utilizado en numerosas aplicaciones debido a la mejora de diversas propiedades: aumento del rango de absorción hasta el visible (Uji et al., 2025, Kumary et al., 2025), disminución de la energía de banda prohibida y prevención de la recombinación electrónica. El dopaje de ZnO con metales ETR introduce niveles de energía adicionales dentro de su estructura de bandas, lo que permite el dopaje de tipo p, que actúa como aceptor de electrones, o el dopaje de tipo n, que funciona como donador de electrones, atrapando los portadores de carga y reduciendo la tasa de recombinación. Se han empleado diversos metales ETR como dopantes para mejorar las propiedades del ZnO (Baig, Siddique y Panchal, 2025).

ZnO-La

El lantano (La) es uno de los metales de tierras raras (TR) que se utiliza frecuentemente como fotocatalizador. El ion La_{3+} tiene un radio iónico de 1,15 Å, mayor que el radio del ion Zn^{2+} de 0,83 Å. El La_{3+} con un radio iónico mayor desarrollará un defecto en la red cristalina del ZnO y, por lo tanto, puede atrapar el electrón, lo que mejora el efecto de campo y la capacidad de almacenamiento de oxígeno (Wong et. al., 2012, Kawanago, et al., 2012).

Kumar et al., (2021) fabricaron con éxito ZnO/La mediante el método de precipitación y lo aplicaron para la fotodegradación de colorantes. Demostraron por difracción de rayos X (DRX), observaron picos similares a los publicados en la literatura, pero observaron un ligero desplazamiento en los picos principales, lo que indica que el ion La_{3+}

está bien incorporado a la red cristalina. El dopaje de La en ZnO aumenta la eficiencia de la actividad fotocatalítica para la degradación de azul de metileno, rodamina B y ácido pírico.

Iqbal y Sohaib (2021) informaron que el dopaje de La en ZnO redujo la energía de la banda prohibida a 3,06 eV y disminuyó la tasa de recombinación electrón-hueco, mejorando así la actividad fotocatalítica bajo irradiación de luz visible. El ion La_{3+} incorporado a la red cristalina de ZnO redujo el tamaño del cristalito, lo que resulta en un aumento del área activa para la reacción fotocatalítica. Al degradar la rodamina B, la combinación ZnO/La con una concentración de La del 2 % mostró una mayor eficiencia de degradación; sin embargo, la eficiencia fotocatalítica disminuyó cuando existía un exceso de lantano en la red cristalina de ZnO debido a su efecto en el aumento de la tasa de recombinación electrón-hueco (Kanan et al., 2020).

ZnO-Ce

El cerio (Ce) es el metal de tierras raras más abundante en la corteza terrestre, presentando una concentración de aproximadamente 60 ppm. A diferencia de otros iones de metales de tierras raras, el cerio puede existir en dos estados redox: Ce^{3+} y Ce^{4+} , con configuraciones electrónicas correspondientes a $4f^7 5d^0$ y $4f^0$, respectivamente. Debido a sus radios iónicos mayores en comparación con el Zn^{2+} (1,03 Å para Ce^{3+} y 0,93 Å para Ce^{4+}), los iones de cerio no logran integrarse en la red cristalina del ZnO. Además, el cerio es conocido por su fuerte absorción de luz en zonas UV y visible, así como por su capacidad para reducir la energía de la banda prohibida en forma de óxido.

Investigaciones realizadas por Bomila et al., (2018) han demostrado que la síntesis de ZnO/Ce mediante un método químico húmedo permite aplicaciones antibacterianas, donde la inclusión de Ce^{3+} reduce la banda prohibida de ZnO de 3,05 eV a 2,76 eV. Esta modificación amplía la absorción de ZnO hacia el rango visible, además de generar nuevos orbitales moleculares desocupados que contribuyen a la reducción de la banda prohibida. Este fenómeno está asociado a un aumento en la distancia atómica, lo que facilita aún más la disminución de la banda prohibida. Por otro lado, Chattopadhyay et al. han explorado el comportamiento de la luminiscencia de ZnO/Ce para aplicaciones en bioimagen y biodetección.

Al dopar ZnO con cerio, la reducción de la banda prohibida está relacionada con la transferencia de carga entre la banda de conducción del ZnO y los

orbitales 4f de los iones Ce^{4+} . La incorporación de cerio no solo favorece la formación de vacantes de oxígeno, sino que también genera estados electrónicos localizados dentro de la banda prohibida del ZnO. Esto provoca el estrechamiento de la banda prohibida y la aparición de un segundo pico en la emisión de fotoluminiscencia (PL), atribuido a la sustitución de Zn^{2+} por iones Ce^{4+} y la generación de defectos en la estructura.

ZnO-Nd

El neodimio (Nd) se destaca por su capacidad para mejorar significativamente las propiedades del óxido de zinc (ZnO), permitiendo la reducción de la energía de banda prohibida y favoreciendo la actividad de fotodegradación bajo luz visible.

El neodimio ofrece una mayor excitación UV para la emisión de luz en comparación con la excitación electrónica. Un estudio de Yayapao et al., (2013) demostró que el ZnO dopado con Nd, sintetizado mediante un método de solución asistida por ultrasonidos, exhibe una morfología de nanoagujas tridimensionales con una estructura monocristalina de wurtzita. Este material mostró un aumento del 92 % en la actividad fotocatalítica después de 300 minutos de exposición a la luz, gracias a la función del Nd como aceptor en el proceso de recombinación electrón-hueco.

Además, Chauhan et al., (2013) utilizaron el método sol-gel para sintetizar ZnO/Nd, logrando una distorsión en la estructura cristalina de wurtzita, atribuida al mayor radio iónico del Nd^{3+} en comparación con el Zn^{2+} . Esta relación ZnO/Nd se presentó en forma esférica, con tamaños de partícula que varían entre 20 y 50 nm. Los resultados indicaron que el dopaje con neodimio no solo redujo la banda prohibida de energía de ZnO de 3,31 eV a 3,26 eV, sino que también mejoró la respuesta paramagnética, la cual se intensificó con el aumento de las concentraciones de Nd en la matriz de ZnO.

ZnO-Eu

Los iones de europio (Eu^{3+}) poseen un radio iónico de 0,938 Å, mayor que el del Zn^{2+} , debido a su baja electronegatividad y a un potencial de electrodo estándar de -1,991 V, el europio puede funcionar como supresor de portadores (101). Este material se utiliza habitualmente como dopante, ya que puede mejorar la cristalinidad de los materiales principales (Singh, et al., 2008).

Zong et al., (2014) desarrollaron una película delgada de ZnO/Eu para fotodegradación mediante

el método de precipitación, obteniendo una película cuasi esférica con un tamaño de partícula de aproximadamente 5,67 nm. La presencia de europio reduce inicialmente la recombinación de los pares electrón-hueco fotogenerados. Al aplicarlo a la fotodegradación de naranja de metileno, el fotocatalizador de ZnO/Eu al 1,0% molar demostró una eficiencia del 95,3%, superando al ZnO puro, que alcanzó una eficiencia de tan solo el 75,7% en las mismas condiciones de irradiación con luz UV.

Fonseca et al. (2018) presentaron películas delgadas de ZnO/Eu para células solares, preparadas mediante un método electroquímico-hidrotérmico. Este enfoque dio como resultado una morfología de nanobarras con un diámetro promedio de aproximadamente 500 nm y una longitud de 2100 nm. Cabe destacar que la brecha de banda se midió en 3,21 eV para ZnO y 2,91 eV para ZnO/Eu, lo que indica una mejora en la eficiencia de absorción de energía solar.

Kumawat et al. (2022) sintetizaron ZnO/Eu mediante la técnica de coprecipitación sol-gel, lo que ofrece un gran potencial para aplicaciones en biosensores. En el espectro UV-Vis, se observa que el dopaje de ZnO con iones Eu produce una nueva banda prohibida más pequeña debido a la diferencia en los radios iónicos de Zn^{2+} y Eu^{3+} (106) y a los electrones 4f presentes en ella, lo que resulta en la superposición de los nuevos estados con los estados de banda y provoca una reducción de la banda prohibida.

ZnO-Otras tierras raras

Se han investigado varios metales de tierras raras con propiedades únicas (como Itrio(Y), disprosio (Dy), gadolinio (Gd) y otras) aunque aún no se han divulgado ampliamente.

Kumar et al. (2020) informaron que las películas delgadas de ZnO dopadas con erbio, sintetizadas mediante el método de pirólisis por pulverización, mostraron un aumento en el número de vacantes de oxígeno, lo que mejoró la interacción con el amoníaco y, posteriormente, mejoró el rendimiento de detección de gases de las películas de ZnO dopadas.

En la aplicación práctica, el ZnO dopado con erbio puede proporcionar una alta respuesta del sensor, de hasta el 97,07 %, con buena estabilidad y reproducibilidad del material.

En el estudio previo de Ahmed et al. (2020), el europio y el terbio pueden co-doparse con ZnO y mejorar las

propiedades del material. La presencia de dopantes redujo la energía de la banda prohibida a 2,91 eV, en comparación con los 3,25 eV del ZnO puro, lo que a su vez redujo la tasa de recombinación del par electrón-hueco. Además, esta modificación desplazó el rango de absorción al espectro visible a 427 nm y aumentó la actividad fotocatalítica hasta un 83 % durante la degradación del azul de metileno durante 60 minutos.

Jiang et al. (2019) sintetizaron nanofibras de ZnO dopadas con praseodimio (Pr) mediante una técnica de electrohilado, seguida de calcinación. A diferencia del ZnO puro, que tenía una calidad cristalina relativamente baja y presentaba defectos de oxígeno en los cristallitos, la combinación ZnO/Pr exhibió una calidad cristalina mejorada y una mayor concentración de defectos por deficiencia de oxígeno en la superficie de los cristallitos. Esta mejora facilita una mejor adsorción de especies de oxígeno, lo cual resulta beneficioso para aplicaciones de detección de gases. Además, el material mostró una mayor eficiencia en la emisión ultravioleta, lo que mejoró significativamente su capacidad de detección de oxígeno, con una respuesta del sensor del 71 % registrada a 115 °C.

Colak et al. (2018) estudiaron nanobarras de ZnO dopadas con tulio (Tm) sintetizadas mediante recubrimiento por centrifugación sol-gel y métodos hidrotérmicos. La relación ZnO/Tm demostró una distribución homogénea sobre el sustrato de vidrio, con dimensiones promedio de las barras de aproximadamente 960 nm de longitud y 75 nm de diámetro. La combinación ZnO/Tm aumenta la transmitancia al tiempo que aumenta la concentración de tulio, reduce la energía de la banda prohibida óptica de 3,20 eV a 3,17 eV y aumenta ligeramente el valor de conductividad eléctrica, alrededor de $9,74 \times 10^{-7} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

Kabongo et al. (2021) informaron que el ZnO dopado con holmio (Ho) puede producirse mediante síntesis química húmeda y obtener una cristalinidad altamente distribuida. El ZnO, conocido como material no magnético, puede inducir un comportamiento similar al ferromagnético gracias a la adición de holmio como dopante. El holmio con un gran momento magnético puede inducir un defecto natural en la superficie para mejorar la intensidad magnética y aumentar el número de espines de $1,576 \times 10^{-1}$ para ZnO sin dopar a $3,36 \times 10^{-1}$ con 0,5 mol % de Ho₃.

4. Aplicaciones del óxido de zinc.

Como se ha visto el óxido de zinc (ZnO), en los últimos 10 años ha experimentado un incremento

exponencial en su uso en diferentes ramas de la ciencia (catálisis, celdas de combustibles, paneles solares, etc.), a continuación, se abarcan solo tres aplicaciones de interés que tienen que ver con su potencial de catalizador.

4.1 Aplicaciones del ZnO en fotocatalisis.

Hay una gran cantidad de aplicaciones del óxido de zinc en fotocatalisis, ya sea que se utilice puro, que sea dopado con metales de transición, no metales o tierras raras., en hojas anteriores ya se expusieron algunos ejemplos de esta aplicación., también podemos encontrar al óxido de zinc dopado con bimetales, o compuestitos con algunos soportes. Nos vamos a enfocar a tomar trabajos más recientes.

Belhoul et al. en el 2025, estudio la síntesis de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO-NPs) y su incorporación en polimetilmetacrilato (PMMA) para producir nanocompuestos de PMMA/ZnO-NPs.

El rendimiento fotocatalítico se evaluó mediante la degradación de un tinte azo (rojo ácido) bajo luz UV. Tanto los compuestos de ZnO-NPs como de PMMA/ZnO-NPs lograron hasta un 99% de eliminación de tinte a 10 mg/L en 2 h. Según el estudio cinético, el proceso de fotodegradación siguió un modelo de pseudo-segundo orden. Las dosis óptimas fueron 2,8 g/L para los compuestos de ZnO-NPs y 2 g/L para los compuestos de PMMA/ZnO-NPs. Los compuestos de PMMA/ZnO-NPs demostraron una reciclabilidad moderada durante cuatro ciclos, lo que los hace adecuados para aplicaciones sostenibles de purificación de agua.

4.2 Acción antimicrobial

Durante mucho tiempo, las enfermedades causadas por infecciones bacterianas han sido una grave amenaza para la salud humana. Los nanomateriales de ZnO se han estudiado ampliamente por sus propiedades antibacterianas de amplio espectro contra bacterias grampositivas y gramnegativas, así como su excelente biocompatibilidad en el campo antibacteriano. Aún existe cierta controversia sobre el mecanismo antibacteriano del ZnO, y los principales puntos aceptados por el público son los siguientes:

(i) generación fotocatalítica de especies de oxígeno reactivas (EOR), que es un producto de reducción de un solo electrón del oxígeno, incluyendo $\text{O}_2^{\cdot-}$, $\cdot\text{OH}$ y H_2O_2 . Raghupathi et al. 2011 descubrieron que las nanopartículas de ZnO producían más especies de oxígeno reactivas (EOR) y exhibían

mayor actividad antimicrobiana bajo iluminación UV. Esto se atribuyó principalmente a que los saltos de electrones dentro de las nanopartículas de ZnO podían generar e^- y h^+ fotogenerados, generando además EOR mediante reacciones redox.

De hecho, el O_2^- y el $\cdot OH$ no pueden penetrar las membranas celulares bacterianas debido a su carga negativa, mientras que los iones peróxido penetran fácilmente las membranas celulares e inducen la muerte celular.

En primer lugar, el H_2O_2 ayuda a romper la capa protectora externa de las bacterias: la bicapa fosfolipídica de la membrana celular, que penetra en el interior de las bacterias y reacciona con las biomoléculas internas, como la bicapa lipídica, las proteínas y los ácidos nucleicos, destruyendo la estructura de las bacterias y provocando así su muerte. Es alentador observar que los compuestos de ZnO modificados pudieron generar EOR bajo la excitación de la luz visible, lo cual no fue significativamente dañino para los humanos.

(ii) Liberación de Zn^{2+} . Como cofactor de casi 300 enzimas en organismos vivos (Alan y Kelleher 2012), el Zn^{2+} tiene una afinidad específica por los grupos azufre e inhibe las enzimas glucolíticas oxidando sus grupos tiol (Coi et al 2010). Sin embargo, dado que las reacciones glucolíticas ocurren en el citoplasma, las EOR producidas en este momento abrirán canales para que el Zn^{2+} cruce la membrana celular de las bacterias y podría desnaturalizar sus proteínas internas e interrumpen la proliferación. El Zn^{2+} también interrumpe el transporte de electrones, lo que permite la interrupción de la respiración celular. Cabe destacar que la liberación de Zn^{2+} , a pesar de ser bactericida sinérgica, también puede aumentar la toxicidad para las células normales.

(iii) Endocitosis. Las paredes celulares bacterianas tienen carga negativa, y las nanopartículas de ZnO pueden adherirse a la superficie externa de las bacterias mediante el efecto electrostático del Zn^{2+} sobre las membranas con carga negativa. Este fenómeno puede alterar el potencial de reposo de la membrana celular e inducir su despolarización al bloquear los canales de K^+ (Warren y Payme 2015, Happy et al., 2018) presentes en la membrana celular, lo que provoca la pérdida de la integridad de la bicapa fosfolipídica y la fuga de componentes intracelulares como lipopolisacáridos y ATP de la célula, lo que finalmente provoca la muerte celular. Curiosamente, los investigadores descubrieron que la pérdida de la integridad de la membrana celular era la principal causa del efecto antibacteriano de las nanopartículas de ZnO sobre *E. coli* (Brayner et al., 2006). Padmavathy y Vijayaraghavan en el

2008 descubrieron que cuanto mayor es la superficie de ZnO, mayor es la concentración de especies de oxígeno superficial y, cuanto más pequeñas son las partículas, mayor es la actividad antibacteriana, lo que abre la puerta a una terapia sin fármacos.

Valenzuela et al. (2020) informaron que el recubrimiento fotocatalítico ZnO-rGO mostró una excelente capacidad bactericida contra la bacteria grampositiva *Staphylococcus aureus* mediante la reducción de la recombinación de pares e^-/h^+ y la mejora de la producción de $\cdot OH$ por ZnO.

Esto mostró excelentes propiedades bactericidas y una alta estabilidad en la prevención de la adhesión y transmisión bacteriana, lo que lo convierte en una excelente opción para la funcionalización antimicrobiana de superficies.

Miao et al. (2022) introdujo C en ZnO poroso con alta superficie específica mediante el método de inducción por microondas, que puede superar la limitación y solo ser excitado por fuentes de luz de longitud de onda corta que son dañinas para el cuerpo humano. El ZnO modificado con C podría ser excitado por luz amarilla con mayor bioseguridad, mejorando su actividad fotocatalítica. Se verificó que las EOR generadas por el ZnO modificado podían degradar eficazmente los pigmentos de la superficie dental, lo que proporciona una nueva estrategia para el blanqueamiento dental y amplía su aplicación en el campo biomédico.

Bitar et al. (2022) informaron sobre el co-dopaje de ZnO con La^{3+} y Ce^{3+} utilizando EDTA como agente de recubrimiento, y la transmisión de ZnO en el rango visible aumentó después del dopaje.

La capacidad antibacteriana también se midió mediante el método de difusión en pocillos de agar, y las nanopartículas mejoradas de $Zn_{1-2x}La_xCe_xO$ mostraron excelentes efectos antibacterianos contra bacterias gramnegativas y grampositivas.

Las enfermedades causadas por la invasión de hongos han amenazado seriamente la vida y la salud de más de mil millones de personas en todo el mundo. Los antibióticos son propensos a desencadenar la aparición de resistencia a los fármacos, y la baja tasa antibacteriana de los nanomateriales antibacterianos comunes no pueden contrarrestar su amenaza para la salud de las personas.

Medina-Ramírez et al. (2022) utilizaron un método solvotérmico asistido por microondas para dopar Cu_2p en la red de ZnO y reducir la brecha de energía, logrando así una mayor capacidad antibacteriana. Posteriormente, los autores depositaron Ag sobre

la superficie para alterar la estructura del hongo, lo que podría inhibir la formación de biopelículas con alta actividad antibacteriana contra hongos aerotransportados, reduciendo así el riesgo de que estos invadan nuestros pulmones y causen infecciones.

4.3 Degradación de tumores (cáncer)

El cáncer amenaza la salud humana, el gran potencial del ZnO para su tratamiento se basa en tres puntos principales:

(i) Las nanopartículas de ZnO pueden utilizarse como transportadores de fármacos tras la funcionalización superficial para administrar fármacos antitumorales a las células tumorales y, por lo tanto, eliminarlas. Tras la funcionalización superficial, las nanopartículas de ZnO pueden utilizarse como transportadores de fármacos para administrar moléculas antitumorales (como genes, proteínas, visualizadores, etc.) a las zonas lesionadas y eliminar las células tumorales.

(ii) Las células cancerosas no siguen el ciclo de producción de energía del ácido tricarbólico (ATC) (Bhardwaj et al. 2010). Producen mayores niveles de lactato a través de la vía glucolítica, incluso en condiciones de hipoxia, y, por lo tanto, presentan una acidez débil en su microambiente biológico. Por el contrario, las nanopartículas de ZnO, como óxido anfótero, pueden ser estables en condiciones fisiológicas normales ($\text{pH} = 7,4$), mientras que las condiciones microácidas tumorales ($\text{pH} = 6,8$) pueden desencadenar la liberación de Zn^{2+} de las nanoestructuras disueltas de las nanopartículas de ZnO, con efectos específicos en la terapia tumoral.

(iii) Las nanopartículas de ZnO pueden generar EOR bajo fotocatálisis para inducir la apoptosis en las células cancerosas al inducir la peroxidación lipídica, alterar la estructura de la membrana celular, desnaturalizar las proteínas y dañar el ADN.

La baja toxicidad de las nanopartículas de ZnO, combinada con estas tres ventajas, se utiliza a menudo en el diagnóstico del cáncer, la bioimagen *in vivo*, la administración inteligente de fármacos y la terapia dirigida contra el cáncer (Anjum et al. 2021). Hasta la fecha, la toxicidad selectiva de las nanopartículas de ZnO en las células cancerosas sigue siendo muy controvertida. La terapia fotodinámica (TFD) mediada por ZnO presenta una mejor biocompatibilidad, pero la limitada penetración de la luz visible en los tejidos biológicos limita su aplicación en tumores superficiales o en combinación con la irradiación con guía de ondas ópticas para tratar tejidos cancerosos profundos pero

palpables, lo que limita su aplicación antitumoral (Ancoa et al. 2018).

Hasta el momento, debido a su baja penetración de la luz, las nanopartículas de ZnO se han estudiado menos como fotocatalizador para la terapia contra el cáncer, y se han utilizado a menudo como transportador para la administración de fármacos dirigidos al tumor en la terapia anticancerígena.

Han et al. (2015) desarrollaron una terapia combinada que combina PDT y quimioterapia mediante la carga de fármacos anticancerígenos en nanopartículas de ZnO, lo que mostró un mayor daño a las células cancerosas *in vitro* en comparación con la terapia única. Sin embargo, cabe considerar que este sistema de administración no evita el daño UV a la piel humana, lo que también limita su aplicación *in vivo*.

Cai et al. (2020) informaron sobre una nanopartícula sensible al pH mediada por el infrarrojo cercano (IR) de 808 nm ($\alpha\text{-NaYbF}_4\text{:Tm@CaF}_2\text{:Nd@ZnO-PAA-DOX}$). El IR de 808 nm tiene una fuerte capacidad de penetración tisular y buena biocompatibilidad. Bajo su excitación, el Yb^{3+} , el Tm^{3+} y el Nd^{3+} en las nanopartículas de núcleo/capa emiten luz ultravioleta para excitar el ZnO y producir EOR, lo que ofrece una nueva idea para la terapia fotodinámica. Además, en la tendencia de la medicina de precisión, los investigadores han combinado nanopartículas de ZnO con modalidades de visualización por imágenes mediante la administración dirigida de fármacos a las células cancerosas, lo que aporta nuevas ideas para el tratamiento del cáncer.

5. Conclusiones

El óxido de zinc (ZnO) se ha evidenciado como un catalizador efectivo en procesos de fotólisis y fotocatálisis, destacándose por su bajo costo, alta actividad catalítica y buena estabilidad.

Actualmente, la tendencia es modificar este material para que se active con luz solar y, al mismo tiempo, explorar diferentes métodos de síntesis. Estas variaciones permiten obtener partículas con distintas morfologías, lo cual está estrechamente relacionado con las condiciones de calcinación, los precursores químicos utilizados, y el método de síntesis empleado.

Para potenciar su actividad bajo luz solar, el ZnO ha sido modificado mediante la incorporación de metales de transición, metales alcalinos térreos, tierras raras, así como metales nobles y no metales. Cada una de estas incorporaciones aporta

propiedades únicas, siendo un objetivo fundamental minimizar la recombinación de cargas, fenómeno que algunas tierras raras logran mitigar. Entre sus diversas aplicaciones, el óxido de zinc se utiliza en la degradación de compuestos orgánicos y en la eliminación de fármacos, entre otros usos.

Referencias

- Ahmad, I., Shoaib Akhtar, M., Ahmed, E., Ahmad, M., Keller, V., Qamar Khan, W., & Khalid, N. R. (2020). Rare earth co-doped ZnO photocatalysts: solution combustion synthesis and environmental applications. *Separation and Purification Technology*, 237, 116328. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116328>
- Alam, S., & Kelleher, S. L. (2012). Cellular mechanisms of zinc dysregulation: a perspective on zinc homeostasis as an etiological factor in the development and progression of breast cancer. *Nutrients*, 4(8), 875–903. <https://doi.org/10.3390/nu4080875>
- Ancona, A., Dumontel, B., Garino, N., Demarco, B., Chatzitheodoridou, D., Fazzini, W., Engelke, H., & Cauda, V. (2018). Lipid-coated zinc oxide nanoparticles as innovative ROS-generators for photodynamic therapy in cancer cells. *Nanomaterials*, 8(3), 143. <https://doi.org/10.3390/nano8030143>
- Anjum, S., Hashim, M., Malik, S. A., Khan, M., Lorenzo, J. M., Abbasi, B. H., & Hano, C. (2021). Recent advances in zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) for cancer diagnosis, target drug delivery, and treatment. *Cancers*, 13(18), 4570. <https://doi.org/10.3390/cancers13184570>
- Armaković, S. J., Savanović, M. M., & Armaković, S. (2022). Titanium dioxide as the most used photocatalyst for water purification: An overview. *Catalysts*, 13, 26. <https://doi.org/10.3390/catal13010026>
- Arzaee, N. A., Betti, N., Al-Amiery, A., & Roslam Wan Isahak, W. N. (2023). The role of tin species in doped iron (III) oxide for photocatalytic degradation of methyl orange dye under UV light. *Heliyon*, 9, e18076. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18076>
- Babikier, M., Wang, D., Wang, J., Li, Q., Sun, J., Yan, Y., Yu, Q., & Jiao, S. (2014). Fabrication and properties of sulfur (S)-doped ZnO nanorods. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(1), 157–162. <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1606-4>
- Baig, A., Siddique, M., & Panchal, S. (2025). A review of visible-light-active zinc oxide photocatalysts for environmental applications. *Catalysts*, 15(2), 100. <https://doi.org/10.3390/catal15020100>
- Belhoul, H., Terchi, S., Ladjal, N., Meftah, L., Deghfel, B., Zoukel, A., & Mohamad, A. A. (2025). Synthesis, characterization, and photocatalytic applications of ZnO nanoparticles-embedded PMMA nanocomposites for sustainable water purification. *Journal of the Australian Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1007/s41779-025-01214-y>
- Bhardwaj, V., Rizvi, N., Lai, M. B., Lai, J. C. K., & Bhushan, A. (2010). Glycolytic enzyme inhibitors affect pancreatic cancer survival by modulating its signaling and energetics. *Anticancer Research*, 30(3), 743–749.
- Bitar, M., Khalil, M., & Awad, R. (2022). Effect of La³⁺ and Ce³⁺ dopant ions on structural, optical, magnetic, and antibacterial activity of ZnO nanoparticles. *Materials Today Communications*, 33, Article 104683. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104683>
- Bomila, R., Srinivasan, S., Venkatesan, A., Bharath, B., & Perinbam, K. (2018). Structural, optical, and antibacterial activity studies of Ce-doped ZnO nanoparticles prepared by wet-chemical method. *Materials Research Innovations*, 22(6), 379–386. <https://doi.org/10.1080/14328917.2017.1324379>
- Bousslama, W., Elhouichet, H., & Férid, M. (2017). Enhanced photocatalytic activity of Fe doped ZnO nanocrystals under sunlight irradiation. *Optik*, 134, 88–98.
- Brayner, R., Ferrari-Iliou, R., Brivois, N., Djediat, S., Benedetti, M. F., & Fiévet, F. (2006). Toxicological impact studies based on Escherichia coli bacteria in ultrafine ZnO nanoparticles colloidal medium. *Nano Letters*, 6(4), 866–870. <https://doi.org/10.1021/nl060036o>
- Cai, Q., Yang, D., Zhong, L., & Yang, P. (2020). A pH-activable chemo-photodynamic therapy based on cube-wrapped-cube α -NaYbF₄: Tm@CaF₂/Nd@ZnO nanoparticles mediated by 808 nm light. *Chemistry of Materials*, 32(17), 7492–7506. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c>
- Castro, P., & Medina, L. (2018). Revestimientos industriales usando Zincóxido: Más allá de la protección. *Coatings Science and Technology*, 12(2), 75–89. <https://doi.org/10.3390/coat12020075>
- Chakravorty, A., & Roy, S. (2024). A review of photocatalysis, basic principles, processes, and materials. *Sustainable Chemistry and Environmental*, 8, 100155. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100155>
- Chauhan, S., Kumar, M., Chhoker, S., Katyal, S. C., & Awana, V. P. S. (2013). Structural, vibrational, optical and magnetic properties of sol-gel derived Nd doped ZnO nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(10), 5102–5110. <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1530-6>
- Choi, E.-K., Lee, H.-H., Kang, M.-S., Kim, B.-G., Lim, H.-S., Kim, S.-M., & Kang, I.-C. (2010). Potentiation of bacterial killing activity of zinc chloride by pyrrolidine dithiocarbamate. *Journal of Microbiology*, 48(1), 40–43. <https://doi.org/10.1007/s12275-010-0070-2>
- Çolak, H., & Karaköse, E. (2018). Tm-doped ZnO

- nanorods as a TCO for PV applications. *Journal of Rare Earths*, 36(11), 1067–1073. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.03.020>
- da Fonseca, A. F. V., Siqueira, R. L., Landers, R., Ferrari, J. L., Marana, N. L., Sambrano, J. R., La Porta, F. de A., & Schiavon, M. A. (2018). A theoretical and experimental investigation of Eu-doped ZnO nanorods and their application on dye sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 739, 939–947. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.262>
- Dib, K., Trari, M., & Bessekhouad, Y. (2020). Co-doped ZnO properties and enhanced photocatalytic activity. *Applied Surface Science*, 505, 144541. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144541>
- Elamin, N., Modwi, A., Aissa, M. A. B., Taha, K. K., Al-Duaij, O. K., & Yousef, T. A. (2021). Fabrication of Cr–ZnO photocatalyst by starch-assisted sol-gel method for photodegradation of congo red under visible light. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 2234–2248. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04988-y>
- Elhalil, A., Elmoubarki, R., Farnane, M., Machrouhi, A., Mahjoubi, F. Z., Sadiq, M., Qourzal, S., & Barka, N. (2018). (Title of the article not provided). *Environmental Nanotechnology Monitoring and Management*, 10, 63–72.
- Espinosa, M., & Correa, J. (2020). Zinc óxido en tratamientos de aguas residuales: Eficiencia y sostenibilidad. *Water Science and Technology*, 81(5), 1023–1035. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.045>
- Fernández, T., y Silva, C. (2022). Detección y descomposición de contaminantes utilizando ZnO fotocatalítico. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 458–472. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102345>
- Gavade, N. L., Kadam, A. N., Babar, S. B., Gophane, A. D., Garadkar, K. M., & Lee, S. W. (2020). Biogenic synthesis of gold-anchored ZnO nanorods as photocatalyst for sunlight-induced degradation of dye effluent and its toxicity assessment. *Ceramics International*, 46, 11317–11327. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.149>
- Ghamarpoor, R., Fallah, A., & Jamshidi, M. (2024). A review of synthesis methods, modifications, and mechanisms of ZnO/TiO₂-based photocatalysts for photodegradation of contaminants. *ACS Omega*, 9, 25457–25492. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08717>
- Gómez, R., & Martínez, A. (2021). Modificación del Zinc óxido: Avances y desafíos. *Revista de Materiales Avanzados*, 15(3), 221–234.
- Han, Z., Wang, X., Heng, C., Han, Q., Cai, S., Li, J., Qi, C., Liang, W., Yang, R., & Wang, C. (2015). Synergistically enhanced photocatalytic and chemotherapeutic effects of aptamer-functionalized ZnO nanoparticles towards cancer cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(33), 21576–21582. <https://doi.org/10.1039/C5CP03377A>
- Happy, A., Soumya, M., Venkat Kumar, S., & Rajeshkumar, S. (2018). Mechanistic study on antibacterial action of zinc oxide nanoparticles synthesized using green route. *Chemico-Biological Interactions*, 286, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.04.019>
- Hassan, J. J., Mahdi, M. A., Chin, C. W., Abu-Hassan, H., & Hassan, Z. (2012). Fabrication of ZnO nanorod/p-GaN high-brightness UV LED by microwave-assisted chemical bath deposition with Zn(OH)₂–PVA nanocomposites as seed layer. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 46, 254–258.
- Iqbal, T., & Sohaib, M. (2021). Synthesis of novel lanthanum-doped zinc oxide nanoparticles and their application for wastewater treatment. *Applied Nanoscience*, 11(5), 2599–2609. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02104-y>
- Jacob, A. A., Balakrishnan, L., Shambavi, K., & Alex, Z. C. (2017). MultiBand visible photoresponse study of Co²⁺ doped ZnO nanoparticles. *RSC Advances*, 7, 39657–39665. <https://doi.org/10.1039/C7RA07611G>
- Jiang, T., Du, B., Zhang, H., Yu, D., Sun, L., Zhao, G., Yang, C., Sun, Y., Yu, M., & Ashfold, M. N. R. (2019). High-performance photoluminescence-based oxygen sensing with Pr-modified ZnO nanofibers. *Applied Surface Science*, 483, 922–928. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.053>
- Jiang, Z., Cheng, B., Zhang, Y., Wageh, S., Al-Ghamdi, A. A., Yu, J., & Wang, L. (2022). S-scheme ZnO/WO₃ heterojunction photocatalyst for efficient H₂O₂ production. *Journal of Materials Science & Technology*, 124, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.01.029>
- Kabongo, G. L., Mhlongo, G. H., & Dhlamini, M. S. (2021). Unveiling semiconductor nanostructured based holmium-doped ZnO: Structural, luminescent and room temperature ferromagnetic properties. *Nanomaterials*, 11(10), Article 2611. <https://doi.org/10.3390/nano11102611>
- Kadhim, M. J., Mahdi, M., Hassan, J. J., & Al-Asadi, A. S. (2021). Photocatalytic activity and photoelectrochemical properties of Ag/ZnO core/shell nanorods under low-intensity white light irradiation. *Nanotechnology*, 32, 195706. DOI: 10.1088/1361-6528/abe3b3.
- Kaneva, N., Stambolova, I., Blaskov, V., Dimitriev, Y., Vassilev, S., & Dushkin, C. (2010). Photocatalytic activity of nanostructured ZnO films prepared by two different methods for the photoinitiated decolorization of malachite green. *Journal of Alloys and Compounds*, 500(2), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.020>
- Kannan, K., Radhika, D., Nesaraj, A. S., Sadasivuni, K. K., Reddy, K. R., Kasai, D., & Raghu, A. V. (2020). Photocatalytic, antibacterial and electrochemical properties of novel rare earth metal oxides-based nanohybrids. *Materials Science in Energy Technologies*, 3, 853–861. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.10.008>
- Kawanago, T., Suzuki, T., Lee, Y., Kakushima, K., Ahmet,

- P., Tsutsui, K., Nishiyama, A., Sugii, N., Natori, K., Hattori, T., & Iwai, H. (2012). Compensation of oxygen defects in La-silicate gate dielectrics for improving effective mobility in high-k/metal gate MOSFET using oxygen annealing process. *Solid State Electronics*, 68, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2012.02.008>
- Kumar, A. K. D., Valanarasu, S., Ponraj, J. S., Fernandes, B. J., Shkir, M., AlFaify, S., Murahari, P., & Ramesh, K. (2020). Effect of Er doping on the ammonia sensing properties of ZnO thin films prepared by a nebulizer spray technique. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 144, 109513. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2020.109513>
- Kumar, M., Negi, K., Umar, A., & Chauhan, M. S. (2021). Photocatalytic and fluorescent chemical sensing applications of La-doped ZnO nanoparticles. *Chemistry Papers*, 75(5), 1555–1566. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01388-8>
- Kumawat, A., Chattopadhyay, S., Verma, R. K., & Misra, K. P. (2022). Eu doped ZnO nanoparticles with strong potential of thermal sensing and bioimaging. *Materials Letters*, 308, 131221. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131221>
- López, J., & Pérez, M. (2020). Aplicaciones biomedicas del ZnO: Efectos antibacterianos y anticancerígenos. *Journal of Biomedical Science*, 28(2), 145-158.
- Lu, X., Liu, F., Dang, Y., Li, M., Ruan, M., Wu, M., Zhu, C., Mani, T., Suib, S. L., & Gao, P.-X. (2022). Transition-metal doped titanate nanowire photocatalysts boosted by selective ion-exchange induced defect engineering. *Applied Surface Science*, 591, 153116. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153116>
- Macías-Sánchez, J. J., Hinojosa-Reyes, L., Caballero-Quintero, A., de la Cruz, W., Ruiz-Ruiz, E., Hernández-Ramírez, A., & Guzmán-Mar, J. L. (2015). Synthesis of nitrogen-doped ZnO by sol-gel method: Characterization and its application on visible photocatalytic degradation of 2,4-D and picloram herbicides. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 14, 536–542. <https://doi.org/10.1039/C5PP00077A>
- Majumder, S., Chatterjee, S., Basnet, P., & Mukherjee, J. (2020). ZnO based nanomaterials for photocatalytic degradation of aqueous pharmaceutical waste solutions – A contemporary review. *Environmental Nanotechnology Monitoring and Management*, 14, 100386. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100386>
- Medina-Ramírez, I. E., Marroquin-Zamudio, A., Martínez-Montelongo, J. H., Romo-Lozano, Y., Zapien, J. A., & Perez-Larios, A. (2022). Enhanced photocatalytic and antifungal activity of ZnO–Cu²⁺ and Ag@ZnO–Cu²⁺ materials. *Ceramics International*, 48(9), 12660–12674. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.053>
- Mehrabad, J. T., Partovi, M., & Rad, A. (2019). Nitrogen doped TiO₂ for efficient visible light photocatalytic dye degradation. *Iranian Journal of Catalysis*, 9, 233-239.
- Mehrali-Afjani, M., Nezamzadeh-Ejhi, A., & Aghaei, H. (2020). A brief study on the kinetic aspect of the photodegradation and mineralization of BiOI-Ag₃PO₄ towards sodium diclofenac. *Chemical Physics Letters*, 759, 137873. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137873>
- Mohamed, K. M., Benitto, J. J., Vijaya, J. J., & Bououdina, M. (2023). Recent advances in ZnO-based nanostructures for the photocatalytic degradation of hazardous, non-biodegradable medicines. *Crystals*, 13, 329. <https://doi.org/10.3390/cryst13020329>
- Nigussie, G. Y., Tesfamariam, G. M., Tegegne, B. M., Weldemichel, Y. A., Gebreab, T. W., Gebrehiwot, D. G., & Gebremichel, G. E. (2018). Antibacterial activity of Ag-doped TiO₂ and Ag-doped ZnO nanoparticles. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 5927485. <https://doi.org/10.1155/2018/5927485>
- Ola, O., & Maroto-Valer, M. M. (2015). Review of material design and reactor engineering on TiO₂ photocatalysis for CO₂ reduction. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 24, 16–42. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2015.06.001>
- Padmavathy, N., & Vijayaraghavan, K. (2008). Enhanced bioactivity of ZnO nanoparticles—an antimicrobial study. *Scientific Reports*, 9(3), Article 035004. <https://doi.org/10.1088/1465-4330/9/3/035004>
- Pal, S., Das, A., & Basak, D. (2024). Tailoring the electrical and magneto-electric transport properties of ZnO films via Ti ion implantation. *Journal of Applied Physics*, 135, 145105.
- Patil, A. B., Patil, K. R., & Pardeshi, S. K. (2010). Ecofriendly synthesis and solar photocatalytic activity of S-doped ZnO. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1–3), 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.038>
- Patil, P. M., Sanakki, B., Mathad, S. N., Veena, E., & Gandad, S. (2023). A review on non-metal and metal doped ZnO: Fundamental properties and applications. *APTEFF*, 54, 277-299. <https://doi.org/10.2298/APT2354277P>
- Pouretedal, H. R., Fallahgar, M., Pourhasan, S., & Nasiri, M. (2017). Taguchi optimization of photodegradation of yellow water of trinitrotoluene production catalyzed by nanoparticles TiO₂/N under visible light. *Iranian Journal of Catalysis*, 7, 317-326.
- Qi, K., Xing, X., Zada, A., Li, M., Wang, Q., Liu, S.-y., Lin, H., & Wang, G. (2020). Transition metal doped ZnO nanoparticles with enhanced photocatalytic and antibacterial performances: Experimental and DFT studies. *Ceramics International*, 46(2), 1494-1502. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.116>
- Ramírez, J., & Salinas, D. (2021). Comprender los mecanismos de ZnO en diferentes entornos: Un enfoque integral. *Materials Chemistry and Physics*, 260, 124043. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124043>
- Rathika, A., & Irine, T. M. (2022). Synthesis of silver

- (Ag) doped zinc oxide (ZnO) nanoparticles as efficient photocatalytic activity for degradation of methylene blue dye. *Journal of Advanced Scientific Research*, 13(2), 129-135. <https://doi.org/10.55218/JASR.202200000>
- Rodríguez, E., & Huertas, J. (2019). Estabilidad y escalabilidad de compuestos de Zincóxico: Un enfoque crítico. *Advanced Functional Materials*, 29(14), 1801324. <https://doi.org/10.1002/adfm.201801324>
- Rostami-Vartooni, A., Moradi-Saadatmand, A., Bagherzadeh, M., & Mahdavi, M. (2019). Green synthesis of Ag/Fe₃O₄/ZrO₂ nanocomposite using aqueous Centaurea cyanus flower extract and its catalytic application for reduction of organic pollutants. *Iranian Journal of Catalysis*, 9, 27-35.
- Salgado, A., & Ortega, N. (2023). Alcance del Zincóxico en soluciones sostenibles: Estado actual y proyecciones. *Sustainable Materials*, 7(4), 29.
- Sanakousa, F. M. R., Vidyasagar, C., Jiménez-Pérez, V. M., & Prakash, K. (2022). Recent progress on visible-light-driven metal and non-metal doped ZnO nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutants. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 140, 106390.
- Sanakousar, F. M., Vidyasagar, C. C., Jiménez-Pérez, V. M., & Prakash, K. (2022). Recent progress on visible-light-driven metal and non-metal doped ZnO nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutants. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 140, 106390. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106390>
- Singh, M. P., Shalini, K., Shivashankar, S. A., Deepak, G. C., Bhat, N., & Shripathi, T. (2008). Microstructure, crystallinity, and properties of low-pressure MOCVD-grown europium oxide films. *Materials Chemistry and Physics*, 110(2), 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.02.017>
- Zong, Y., Li, Z., Wang, X., Ma, J., & Men, Y. (2014). Synthesis and high photocatalytic activity of Eu-doped ZnO nanoparticles. *Ceramics International*, 40(8), 10375–10382. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.02.123>
- Sun, H., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2022). Bimetallic CuPd alloy nanoparticles decorated ZnO nanosheets with enhanced photocatalytic degradation of methyl orange dye. *Journal of Colloid and Interface Science*, 629, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.09.054>
- Sun, Y., Zhang, W., Li, Q., Liu, H., & Wang, X. (2023). Preparations and applications of zinc oxide based photocatalytic materials. *Advanced Sensor and Energy Materials*, 2(3), 100069. <https://doi.org/10.1016/j.asems.2023.100069>
- Thi, V. H. T., & Lee, B. K. (2017). Effective photocatalytic degradation of paracetamol using La-doped ZnO photocatalyst under visible light irradiation. *Materials Research Bulletin*, 96, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.04.028>
- Torres, F., & Martínez, R. (2023). Dispositivos optoelectrónicos a base de ZnO: Estado del arte. *Optoelectronics and Nanotechnology Journal*, 11(1), 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.onj.2023.01.005>
- Uji Pratomo, N., Adzani, M. D., Irkham, I., Sulaeman, A. P., Eddy, D. R., Mulyana, J. Y., & Primadona, I. (2025). Doping of rare earth element: The effects on elevated physical and optical properties of ZnO. *Talanta Open*, 11, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2025.100411>
- Ullah, R., & Dutta, J. (2008). Photocatalytic degradation of organic dyes with manganese-doped ZnO nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 156, 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.087>
- Vakili, B., Shahmoradi, B., Maleki, A., Safari, M., Yang, J., Pawar, R. R., & Lee, S. M. (2019). Synthesis of immobilized cerium doped ZnO nanoparticles through the mild hydrothermal approach and their application in the photodegradation of synthetic wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 280, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.12.103>
- Valenzuela, L., Iglesias-Juez, A., Bachiller-Baeza, B., Faraldos, M., Bahamonde, A., & Rosal, R. (2020). Biocide mechanism of highly efficient and stable antimicrobial surfaces based on zinc oxide-reduced graphene oxide photocatalytic coatings. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(36), 8294–8304. <https://doi.org/10.1039/D0TB00568EM>
- Miao, X., Yu, F., Liu, K., Lv, Z., Deng, J., Wu, T., Cheng, X., Zhang, W., Cheng, X., & Wang, X. (2022). High special surface area and “warm light” responsive ZnO: synthesis mechanism, application and optimization. *Bioactive Materials*, 7, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.12.004>
- Velásquez, S., & Romero, D. (2022). Nuevas estrategias de dopaje en ZnO: Perspectivas para aplicaciones futuras. *Journal of Nanomaterials*, 2022, Article 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7567893>
- Warren, E. A. K., & Payne, C. K. (2015). Cellular binding of nanoparticles disrupts the membrane potential. *RSC Advances*, 5(18), 13660–13666. <https://doi.org/10.1039/C4RA02482A>
- Wong, H., Yang, B. L., Kakushima, K., Ahmet, P., & Iwai, H. (2012). Properties of CeO_x/La₂O₃ gate dielectric and its effects on the MOS transistor characteristics. *Vacuum*, 86(7), 990–993. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.09.010>
- Xie, X. Y., Zhan, P., Li, L. Y., Zhou, D. J., Guo, D. Y., Meng, J. X., Bai, Y., & Zheng, W. J. (2015). Synthesis of S-doped ZnO by the interaction of sulfur with zinc salt in PEG200. *Journal of Alloys and Compounds*, 644, 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.04.033>
- Yang, J., Xu, C., Ye, T., Wang, Y., & Meng, D. (2017). Synthesis of S-doped hierarchical ZnO nanostructures via hydrothermal method and their optical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(2), 1785–1792. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-0704-2>

- Yasmeen, H., Zada, A., Ali, S., Khan, I., Ali, W., Khan, W., Khan, M., Anwar, N., Ali, A., Huerta-Flores, A. M., & Subhan, F. (2020). Visible light-excited surface plasmon resonance charge transfer significantly improves the photocatalytic activities of ZnO semiconductor for pollutants degradation. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 67(9), 1-7. <https://doi.org/10.1002/jccs.202000205>
- Yayapao, O., Thongtem, T., Phuruangrat, A., & Thongtem, S. (2013). Ultrasonic-assisted synthesis of Nd-doped ZnO for photocatalysis. *Materials Letters*, 90, 83-86. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.09.027>
- Yilmaz, G., & Dindar, B. (2023). Non-metal doped ZnO photocatalyst prepared by sonication-assisted sol-gel method and use for dye degradation. *Inorganic Chemistry Communications*, 157, 111320. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111320>
- Yousefi, A., & Nezamzadeh-Ejhieh, A. (2021). Preparation and characterization of SnO₂-BiVO₄-CuO catalyst and kinetics of phenazopyridine photodegradation. *Iranian Journal of Catalysis*, 11, 247-259.
- Zhang, X., Qin, J., Hao, R., Wang, L., Shen, X., Yu, R., Limpanart, S., Ma, M., & Liu, R. (2015). Carbon-doped ZnO nanostructures: Facile synthesis and visible light photocatalytic applications. *Journal of Physical Chemistry C*, 119, 20544-20554. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b04671>

Fecha de recepción: 25 de septiembre de 2025.

Fecha de aprobación: 08 de octubre de 2025.

Eliminación del acetaminofén en solución acuosa por fotocátalisis: Una breve revisión

Aguilar Ucán Claudia^{(1)*}
Montalvo Romero Carlos⁽¹⁾
Abatal Mohamed⁽²⁾
Arias Mateo María Cruz⁽¹⁾

RESUMEN

El mercado de productos farmacéuticos presenta un crecimiento sostenido, impulsado por el incremento en la demanda de medicamentos destinados a mitigar o eliminar los síntomas asociados al curso de diversas patologías. Este aumento en el consumo ha derivado en una generación significativa de residuos farmacéuticos, los cuales se han convertido en una fuente emergente de contaminación ambiental, especialmente en cuerpos hídricos. La presencia de principios activos y sus productos de transformación en el medio acuático constituye una preocupación reconocida internacionalmente, tanto por sus efectos eco-toxicológicos como por el riesgo potencial que representan para la salud humana. Los estudios orientados a la evaluación de riesgos, el desarrollo de tecnologías de tratamiento y la eliminación de contaminantes farmacéuticos no muestran una correlación directa con las tendencias del mercado, lo que evidencia una disociación entre el crecimiento comercial y la gestión ambiental de estos compuestos. Entre los medicamentos más consumidos a nivel mundial destaca el acetaminofén, un analgésico y antipirético no opioide ampliamente utilizado en el tratamiento del dolor; su tasa de consumo ha motivado múltiples investigaciones centradas en su eliminación de matrices acuosas, siendo la fotocátalisis una de las técnicas más estudiadas por su eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos persistentes. Esta breve revisión aporta una perspectiva sobre los factores

que inciden en la innovación tecnológica para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con fármacos

Palabras clave

Fármacos, Acetaminofén, Fotocátalisis.

Abstract

The pharmaceutical products market is experiencing sustained growth, driven by the increasing demand for medications aimed at mitigating or eliminating symptoms associated with various pathologies. This rise in consumption has led to a significant generation of pharmaceutical waste, which has emerged as a source of environmental pollution, particularly in aquatic ecosystems. The presence of active pharmaceutical ingredients and their transformation products in water bodies is an internationally recognized concern due to their ecotoxicological effects and the potential risks they pose to human health. Studies focused on risk assessment, treatment technology development, and the removal of pharmaceutical contaminants do not show a direct correlation with market trends, highlighting a disconnect between commercial growth and environmental management of these compounds. Among the most widely consumed medications globally is acetaminophen, a non-

^{(1)*} Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, calle 56 no. 4 Esq. Av. Concordia, Col. Benito Juárez C.P. 24180, Cd. del Carmen Campeche, México. ⁽²⁾ Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma del Carmen, Av. Central S/N, Esq. Mundo Maya Ciudad del Carmen, 24115, Campeche, México.

opioid analgesic and antipyretic commonly used for pain relief; its high consumption rate has prompted numerous studies on its removal from aqueous matrices, with photocatalysis being one of the most researched techniques due to its efficiency in degrading persistent organic pollutants. This brief review offers a perspective on the factors influencing technological innovation for the treatment of pharmaceutical-contaminated wastewater.

Keywords

Pharmaceuticals, Acetaminophen, Photocatalysis.

Introducción

El crecimiento sostenido de la población mundial, el aumento en la esperanza de vida y la prevalencia de estilos de vida sedentarios han incrementado significativamente la demanda de medicamentos orientados a mejorar la calidad de vida y tratar enfermedades crónicas. Por ejemplo, en los últimos años, el consumo de fármacos para reducir el colesterol se ha cuadruplicado, mientras que el uso de antidepresivos, antihipertensivos y antidiabéticos se ha duplicado (González et al., 2021).

A este aumento se suma el uso intensivo de analgésicos, antibióticos, anticonceptivos, anticoagulantes, antiinflamatorios, anestésicos y medicamentos veterinarios, muchos de los cuales se prescriben diariamente, incluso sin receta médica. Esta situación ha contribuido a la acumulación de residuos farmacéuticos y sus productos de transformación en aguas residuales, ríos, arroyos e incluso ambientes marinos, convirtiéndose en una fuente relevante de contaminantes emergentes. Diversos estudios han documentado la presencia de estos compuestos y sus metabolitos en el medio acuático (Bano et al., 2025; Muambo et al., 2024; Ronderos et al., 2022; Ortuzar et al., 2022; Brodin et al., 2013; Walters et al., 2010; Kümmerer et al., 2009; Monpelat et al., 2009)

Actualmente no existen cifras públicas exactas sobre el consumo mundial de acetaminofén en toneladas. No obstante, su magnitud puede estimarse a partir del tamaño del mercado global, que alcanzó aproximadamente 9.8 mil millones de dólares en 2022 y se proyecta que superará los 16.4 mil millones en 2032 (Gonzalez et al., 2021). Aunque los informes de mercado no especifican el volumen en toneladas, el valor comercial sugiere que se trata de miles de toneladas anuales, considerando que el acetaminofén es uno de los analgésicos más utilizados a nivel mundial.

La presencia de Medicamentos en las aguas

Estudios enfocados en la identificación de residuos farmacéuticos han reportado al menos 82 compuestos orgánicos en cuerpos de agua, entre ellos antibióticos, analgésicos, estimulantes, esteroides, hormonas, triclosán, ciprofloxacina, tetraciclina, ibuprofeno y acetaminofén, como algunos de los fármacos con mayores concentraciones detectables (Kolpin et al., 2002; Herberer, 2002). Recientemente, Wilkinson et al. (2022) investigaron la presencia de ingredientes farmacéuticos activos (API) en 258 ríos de 104 países, y sus hallazgos revelaron que más de una cuarta parte de los ríos estudiados contenían API en concentraciones potencialmente tóxicas. Además, los productos farmacéuticos pueden adherirse a partículas sólidas presentes en los lodos de plantas de tratamiento. Cuando estos lodos se utilizan en la agricultura, los medicamentos se dispersan en el medio ambiente, lo que puede conducir a su acumulación. Si animales o humanos consumen plantas cultivadas en estos suelos, su salud podría verse afectada negativamente (Pawłowska & Biczak, 2024).

Los residuos farmacéuticos y sus metabolitos se dispersan ampliamente en el medio ambiente, representando un espectro de sustancias potencialmente peligrosas para la salud humana (Khan, 2023). En los estudios de Herberer & Stan, (1998) y se detectó ácido salicílico principio activo de la aspirina en concentraciones de 0.05 a 1.51 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en aguas residuales. También se identificaron trazas de ibuprofeno (0.05–3.35 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), así como concentraciones menores de diclofenaco, bezafibrato y ácido clofíbrico. En aguas subterráneas influenciadas por infiltración de aguas residuales, se han detectado hasta 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ de ibuprofeno, además de residuos de diclofenaco, ácido clofíbrico y ácido fenofíbrico.

El acetaminofén ha sido detectado en aguas naturales en concentraciones superiores a 6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Brillas et al., 2005). Aunque sus efectos sobre organismos acuáticos aún no se comprenden completamente, se reconoce un riesgo potencial significativo. La evidencia acumulada indica que cuerpos de agua están siendo contaminados por residuos farmacéuticos y sus metabolitos (Busser et al., 1998).

La legislación ambiental vigente no contempla regulaciones específicas para la descarga de estos residuos, dado que sus concentraciones suelen ser inferiores a 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Daughton, 2003). Esta omisión se ha basado en la suposición de que los

medicamentos pueden ser eliminados eficazmente en plantas de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, estudios posteriores han demostrado que muchos compuestos farmacéuticos presentan alta persistencia y efectos ecotoxicológicos acumulativos, incluso letales para microorganismos responsables de la oxidación de materia orgánica (Shuyi Wang et al., 2008).

Actualmente, existe una sólida base de estudios sobre la presencia, destino y comportamiento ambiental de los medicamentos y sus productos de transformación, lo que ha llevado a reconocerlos como una preocupación ambiental y un riesgo emergente para la salud humana (Fent et al., 2006; Azuma et al., 2016; Masomer et al., 2016). Además, se ha documentado una creciente evidencia de efectos adversos en organismos acuáticos, como alteraciones endocrinas, cambios en el comportamiento y toxicidad crónica (Liu et al., 2009; Quinn et al., 2008; Crane et al., 2006). Los disruptores endocrinos también representan una amenaza, ya que pueden inducir alteraciones reproductivas en peces y fauna silvestre (Molinari et al., 2006). Derivados estrogénicos como el 4-nonilfenol y el 4-octilfenol han demostrado capacidad para modificar características sexuales en diversas especies animales (Jobling, 1996). Aunque los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden reducir parcialmente la concentración de estas sustancias, aún no se alcanza una eficiencia suficiente para eliminar completamente sus efectos estrogénicos en organismos acuáticos.

El impacto potencial de estos residuos sobre la salud humana aún no se comprende completamente (Adams et al., 2002; Snyder, 2003). Algunos medicamentos pueden transformarse en compuestos altamente tóxicos. Por ejemplo, la reacción del acetaminofén con hipoclorito de sodio genera dos especies transitorias más tóxicas que el compuesto original: 1,4-benzoquinona y N-acetil-para-benzoquinona, con valores de DL_{50} de 8.5 y 20 $mg \cdot kg^{-1}$, respectivamente (Bedner & Maccheran, 2006).

Shuyi Wang et al. (2008) evaluaron el efecto de ketoprofeno, naproxeno, carbamazepina y ácido clofibrico sobre el crecimiento y la composición de colonias microbianas, observando una inhibición significativa. La alta persistencia ambiental de algunos residuos farmacéuticos, como el ácido clofibrico cuya vida media se ha estimado en hasta 21 años, los convierte en contaminantes particularmente peligrosos (Busser et al., 1998).

Durante las últimas dos décadas, se han desarrollado numerosas investigaciones orientadas a identificar métodos eficaces y viables para la eliminación o degradación de productos farmacéuticos en aguas residuales, superficiales, subterráneas y potables. Estos estudios han concluido que los procesos convencionales de tratamiento no logran eliminar completamente dichos compuestos. En esta revisión se abordarán los procesos fotocatalíticos como una alternativa prometedora para el tratamiento de residuos farmacéuticos, con énfasis en el caso del acetaminofén.

El principio de la fotocatalisis

La fotocatalisis es una técnica perteneciente a los tratamientos de oxidación avanzada (TAO) y ha demostrado ser eficaz en la eliminación de diversos compuestos orgánicos presentes en aguas residuales (Kabra et al., 2004; Aguilar et al., 2019). Este tratamiento avanzado ha sido ampliamente estudiado desde la década de 1970 como una tecnología eficaz para la descontaminación de agua, suelo y aire. Este proceso se basa en una reacción catalítica iniciada por la absorción de luz por parte de un semiconductor, lo que genera especies óxido-reductoras capaces de transformar contaminantes orgánicos en dióxido de carbono, agua y ácidos minerales. La reacción comienza cuando un fotón con energía igual o superior a la banda prohibida del fotocatalizador (Eg) incide sobre su superficie, provocando la excitación electrónica y la formación de pares hueco-electrón (h^+ , e^-), estos pares pueden migrar hacia la superficie del catalizador y reaccionar con las especies adsorbidas. Para que el mecanismo se complete, es necesaria la presencia simultánea de especies oxidantes y reductoras, ya que se requiere al menos una reacción de oxidación y una de reducción (Kabra et al., 2004; Hermann, 1999).

Aunque las aguas residuales pueden tratarse mediante métodos biológicos, o procesos químicos convencionales, estos enfoques resultan insuficientes para eliminar completamente residuos farmacéuticos y otros contaminantes de naturaleza recalcitrante. En consecuencia, se ha incrementado el uso de TAOs, las cuales permiten incluso la desinfección mediante la inactivación de bacterias y virus.

El concepto de TAO fue introducido por Glaze (1987), quien las definió como procesos que generan y utilizan especies transitorias altamente oxidantes, como el radical hidroxilo ($HO\bullet$). Este radical puede producirse mediante medios fotoquímicos, incluida

la radiación solar u otras fuentes de energía, y posee una elevada capacidad para oxidar materia orgánica. Las TAOs presentan ventajas significativas frente a otros métodos, ya que no solo modifican la fase del contaminante, sino que lo transforman químicamente, logrando en muchos casos su mineralización completa. Además, no generan lodos residuales que requieran tratamiento o disposición adicional.

La fotocátalisis en la degradación de acetaminofén

En el marco de la búsqueda de fotocatalizadores avanzados para la eliminación de acetaminofén en aguas residuales, se han desarrollado nanocompuestos que integran carbono, nanopartículas metálicas y estructuras híbridas innovadoras. Estos materiales ofrecen ventajas significativas, como la modificación del ancho de banda, la mejora en la transferencia de masa y la estabilización del catalizador, lo que evita procesos de separación posteriores y mejora la eficiencia del tratamiento.

Diversos estudios recientes han demostrado el potencial de estos sistemas. Hassan et al. (2024) sintetizaron el compuesto ZnO/g-C₃N₄, optimizando la proporción entre nitruro de carbono grafitico y óxido de zinc para ajustar la banda prohibida. Identificaron a los radicales

hidroxilo como los principales agentes de fotorreducción del acetaminofén. En línea con esta estrategia, Chebwogen et al. (2025) compararon nanocompuestos ZnO/GO y ZnO/g-C₃N₄ bajo irradiación UV, observando que la incorporación de grafeno y g-C₃N₄ aumentó el área superficial y la eficiencia fotocatalítica, siendo ZnO/g-C₃N₄ el más efectivo.

Mohammad et al. (2025) propusieron un fotocatalizador NASICON dopado con carbono (NASICON@C), sintetizado por vía hidrotermal. La estructura cristalina obtenida permitió reducir la banda prohibida a 2,05 eV, facilitando la absorción de luz visible y aumentando la superficie activa. Fan et al. (2018) exploraron el uso de Ag/AgCl@ZIF-8, sintetizado por agitación simple, como alternativa viable para la fotodegradación de acetaminofén en solución acuosa. Nasr et al. (2019) demostraron que la deposición de metales nobles (Ag, Au, Pt) sobre TiO₂ mejora la degradación fotocatalítica, aunque con menor velocidad bajo luz solar que con UV. Awadh et al. (2020) utilizaron nanovarillas de ZnO-Ag obtenidas por crecimiento asistido por microondas, destacando su alta actividad fotocatalítica gracias a la separación eficiente de cargas y la absorción de luz visible. Tobajas et al. (2016) desarrollaron un fotocatalizador híbrido TiO₂-ZnO soportado en arcilla deslaminaada, que mostró alta estabilidad y capacidad de degradación

Tabla 1. Características de los catalizadores, destacando las ventajas principales en la degradación fotocatalítica del acetaminofen

Referencia	Fotocatalizador	Fuente de luz	Banda prohibida (eV)	Ventajas principales
Hassan et al. (2024)	ZnO/g-C ₃ N ₄	UV y visible	~2.7	Alta generación de radicales OH, buena absorción de luz
Mohammad et al. (2025)	NASICON@C	Luz visible	2.05	Alta área superficial, absorción eficiente, estructura cristalina
Chebwogen et al. (2025)	ZnO/GO vs ZnO/g-C ₃ N ₄	UV	~2.6-2.8	ZnO/g-C ₃ N ₄ mostró mayor eficiencia y área superficial
Nasr et al. (2021)	TiO ₂ + Ag/Au/Pt	UV y solar	~3.0	Mejora con metales nobles, menor eficiencia con luz solar
Awadh et al. (2020)	ZnO-Ag nanovarillas	Luz visible	~2.4	Separación eficiente de cargas, baja recombinación
Nasr et al. (2019)	TiO ₂ sobre carbón activado	UV	~3.2	Mejora en adsorción y eficiencia de degradación
Awadh et al. (2019)	ZnO nanovarillas	Luz visible	~2.4	Alta actividad por separación de cargas y absorción extendida
Tobaja et al. (2016)	TiO ₂ -ZnO en arcilla deslaminaada	Solar	~2.8	Alta estabilidad y eficiencia en condiciones reales
Fan et al. (2018)	Ag/AgCl@ZIF-8	Luz visible	~2.5	Síntesis simple, buena actividad en solución acuosa
Ghosh & Saha (2015)	TiO ₂ puro	Solar	~3.2	Estudio cinético detallado, generación de radicales OH

bajo irradiación solar. En la tabla 1 se sintetizan estos resultados.

Mecanismos de reacción en la fotocatalísis del acetaminofen

En estudios recientes se ha demostrado que la oxidación del acetaminofén mediante procesos

fotocatalíticos ocurre a través de la formación y posterior desaparición de diversos productos orgánicos intermedios. Entre ellos, la hidroquinona y la benzoquinona destacan como los principales compuestos generados, producto del ataque directo del radical hidroxilo ($\cdot$ OH) sobre la estructura del acetaminofén. Diversas investigaciones han confirmado que los productos finales de la

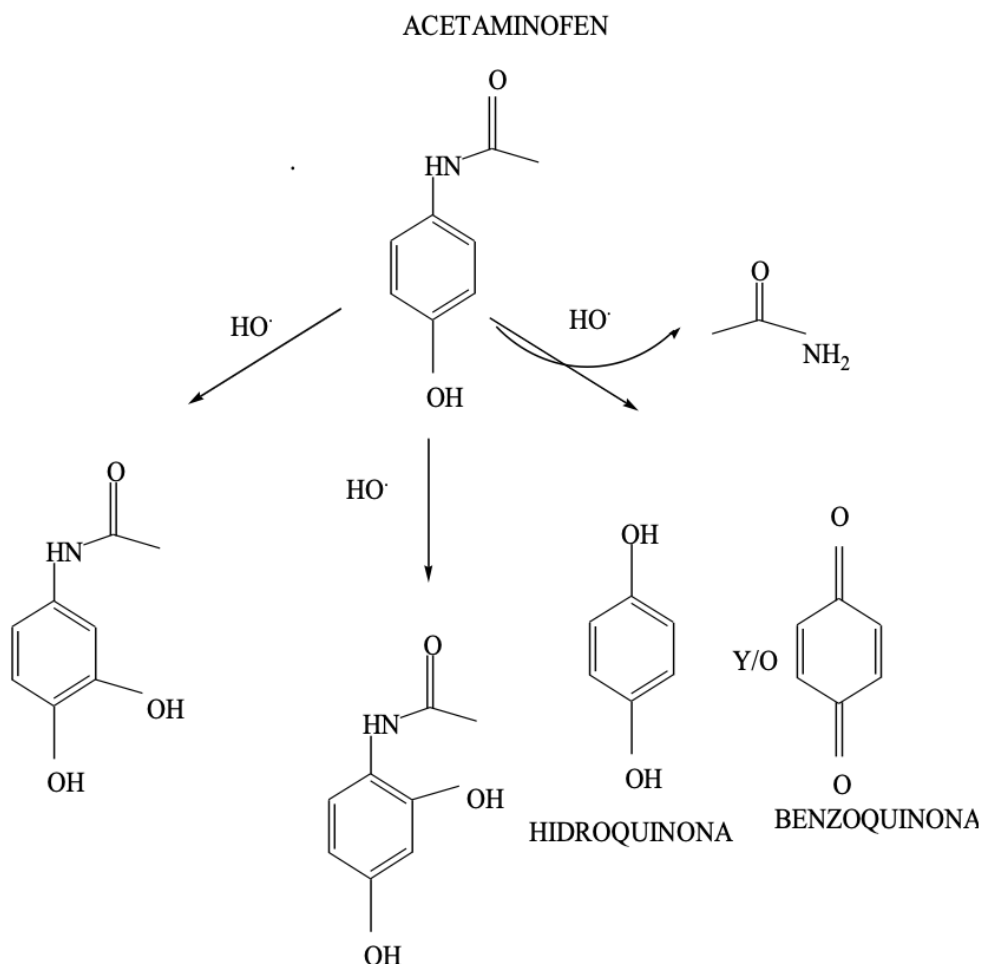
degradación son estructuras oxidadas de bajo peso molecular, con al menos cuatro átomos de carbono (Yang et al., 2008; Yang et al., 2009., Aguilar et al., 2019).

La ruta fotocatalítica de degradación del acetaminofén incluye la formación de otros compuestos intermedios. Uno de los primeros estudios en explorar el mecanismo de reacción fue el de Vogna et al. (2002), quienes reportaron la

generación de 1,4-hidroquinona, 1,4-benzoquinona, 4-acetilaminocatecol y, en menor proporción, 4-acetilaminoresorcina, además de fragmentos de ácido acético, ácido oxálico y ácido fórmico (Figura 1).

Recientemente, Qutob et al. (2022) identificaron como subproductos frecuentes la hidroquinona, 1,4-benzoquinona, 4-aminofenol, acetamida, ácido oxálico, ácido fórmico, ácido acético,

Figura 1. Ruta de degradación del acetaminofén sugerida por Vogna et al., (2002).



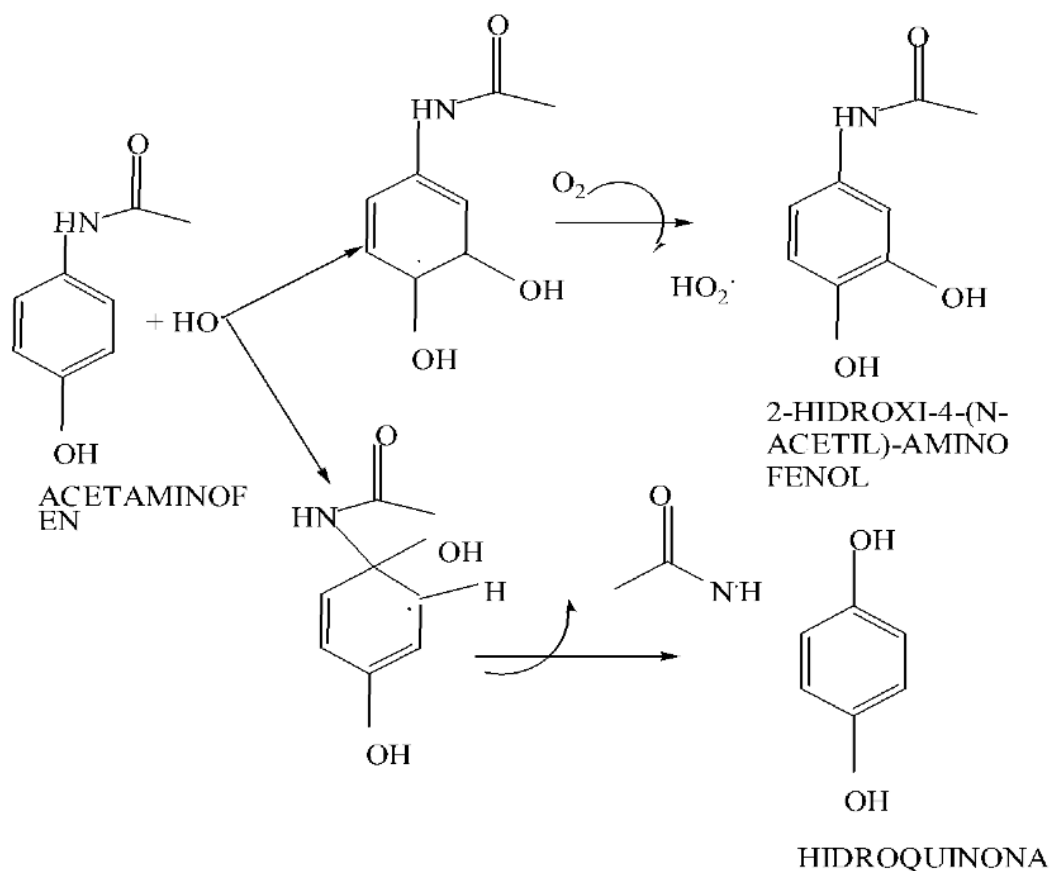
1,2,4-trihidroxibenceno y ácido maleico.

Andreozzi et al. (2003), (Figura 2), en un proceso combinado de fotocatalisis y ozonización, demostraron que los productos intermedios se originan por el ataque del ozono al anillo aromático de la molécula. Además, identificaron una ruta alternativa de degradación que incluye la formación de 1,2,4-trihidroxibenceno y 2-hidroxi-4-(N-acetil-

aminofenol), generados por la inserción del radical hidroxilo. Estos hallazgos sugieren que el ozono favorece la formación de especies hidroxiladas. Dado que este proceso produce radicales $\cdot OH$ y O_2^- , el acetaminofén se transforma rápidamente en otros compuestos orgánicos, entre ellos pequeñas cantidades de catecol.

Por su parte, Bedner y Maccrehan (2006) reportaron

Figura 1. Ruta de degradación del acetaminofén sugerida por Vogna et al., (2002).



la formación de 11 productos intermedios durante la degradación del acetaminofén en presencia de cloro, en condiciones similares a las de una planta de tratamiento de aguas residuales. Entre los compuestos identificados, destacan dos clasificados como tóxicos tipo 2: la 1,4-benzoquinona y la N-acetil-p-benzoquinona imina.

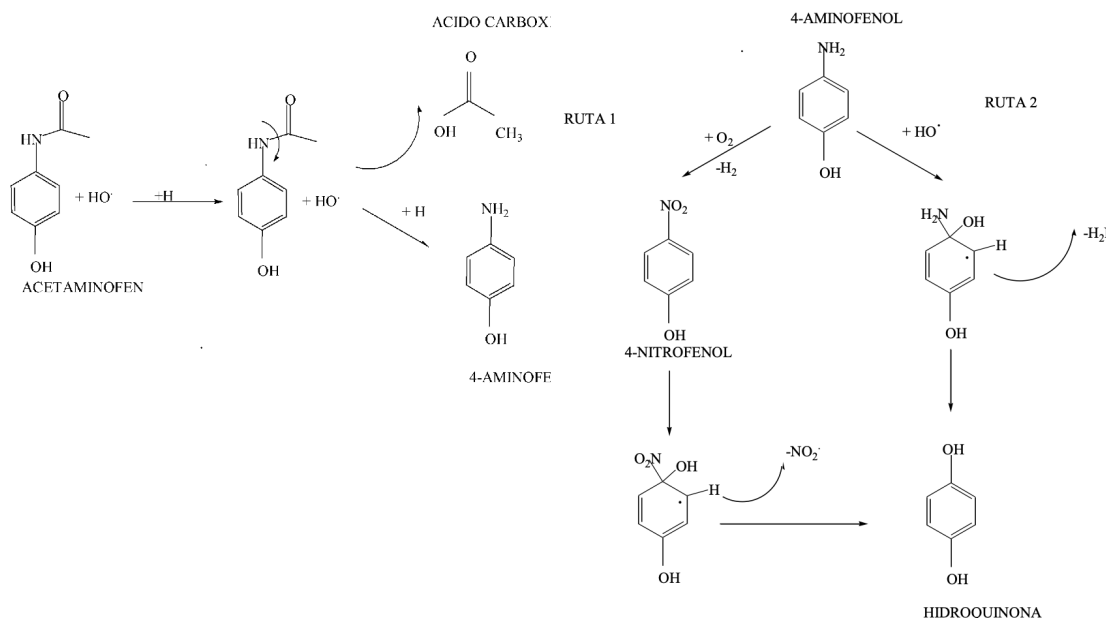
Finalmente (Figura 3); Moctezuma et al. (2012); propusieron rutas de degradación que inician con la formación de aminofenol y/o nitrofenol, los cuales evolucionan hacia hidroquinona y benzoquinona. Ambos compuestos fueron plenamente identificados mediante técnicas de GC-MS y FT-IR, las cuales también evidenciaron la presencia de enlaces N-H y C=O correspondientes a la acetamida, que posteriormente se degrada en ácidos carboxílicos.

Conclusión

La creciente demanda de medicamentos, impulsada por factores demográficos y sociales, ha generado una preocupante acumulación de residuos farmacéuticos en el medio ambiente. La presencia de estos compuestos en cuerpos de agua

y su persistencia en sedimentos y lodos agrícolas evidencian un riesgo latente para la salud humana y los ecosistemas. A pesar de su baja concentración, los efectos acumulativos y la toxicidad de ciertos ingredientes farmacéuticos activos subrayan la necesidad urgente de revisar la legislación ambiental vigente, implementar sistemas de tratamiento más eficaces y fomentar el uso responsable de los medicamentos. Solo mediante una acción coordinada entre gobiernos, industria y sociedad se podrá mitigar el impacto de estos contaminantes emergentes y proteger los recursos hídricos para las generaciones futuras. Diversos estudios han demostrado que los nanocompuestos basados en carbono, óxidos metálicos y estructuras híbridas ofrecen mejoras significativas en la fotodegradación del acetaminofén en aguas. Estas mejoras incluyen mayor área superficial, mejor absorción de luz visible y reducción en la recombinación de cargas. La modificación del ancho de banda y el uso de metales nobles también han contribuido a aumentar la eficiencia de los fotocatalizadores, consolidando su potencial para aplicaciones ambientales en el tratamiento de aguas residuales. En relación a los mecanismos de fotodegradación del acetaminofén

Figura 3. Mecanismo de degradación propuesto por Moctezuma et al., (2012)



se han revelado rutas complejas de oxidación que involucran la formación de diversos productos intermedios, entre los que destacan la hidroquinona y la benzoquinona como compuestos mayoritarios. Estos hallazgos subrayan la importancia de comprender los mecanismos de transformación para evaluar los riesgos ambientales y optimizar los procesos de tratamiento de aguas contaminadas con residuos farmacéuticos.

Referencias

- Adams, C., Asce, M., Wang Y., Loftin K., Meyer M. (2002) Removal of Antibiotics from Surface and Distilled Water in Conventional Water Treatment Processes. *J. Environ. Eng.*, 253-260.
- Aguilar, C. A., Montalvo, C., Zermeño, B., et al. (2019). Degradación fotocatalítica de acetaminofén, tergitol y nonilfenol con catalizadores de TiO_2/Ag bajo luz UV y visible. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 843–852.
- Andreozzi, R., Caprio, V., Marotta, R., & Vogna, D. (2003). Paracetamol oxidation from aqueous solutions by means of ozonation and $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ system. *Water Research*, 37(5), 993–1004.
- Awadh, S., Al-Mutairi, M., & Alotaibi, R. (2020). Microwave-assisted synthesis of ZnO-Ag nanorods for acetaminophen photodegradation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 402, 112812.
- Azuma, T., Arima, N., Tsukada, A., Hirami, S., Matsuoka, R., Moriwake, R., Ishiuchi, H., Inoyama, T., Teranishi, Y., Yamaoka, M., et al. (2016). Detection of pharmaceuticals and phytochemicals together with their metabolites in hospital effluents in Japan, and their contribution to sewage treatment plant influents. *Science of the Total Environment*, 548–549, 189–197.
- Bano, A., Prasad, B., Kumari, M., et al. (2025). Productos farmacéuticos en agua y aguas residuales: Una revisión sobre el riesgo ecológico y las opciones de tratamiento sostenible. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236, 516.
- Bedner, M., & Maccreehan, W. A. (2006). Transformation of acetaminophen by chlorination produces the toxicants 1,4-benzoquinone and N-acetyl-p-benzoquinone imine. *Environmental Science & Technology*, 40(2), 516–522.
- Brodin, T., Fick, J., Jonsson, M., & Klaminder, J. (2013). Dilute concentrations of a psychiatric drug alter behavior of fish from natural populations. *Science*, 339, 814–815.
- Brillas, E., Sirés, I., Arias, C., Cabot, P., Centellas, F., Rodríguez, R., & Garrido, J. A. (2005). Mineralization of paracetamol in aqueous medium by anodic oxidation with a boron-doped diamond electrode. *Chemosphere*, 58(4), 399–406.
- Busser, H. R., Müller, M. D., & Theobald, N. (1998). Occurrence of the pharmaceutical drug clofibric acid and the herbicide mecoprop in various Swiss lakes and in the North Sea. *Environmental Science & Technology*, 32(2), 188–192.
- Chebwojen, J., et al. (2025). A comparative study of sol-gel synthesized ZnO/GO and $\text{ZnO/g-C}_3\text{N}_4$ nanocomposites in the photocatalytic degradation of acetaminophen. *International Journal of Photoenergy*, Article ID 9216858.
- Crane, M., Watts, C., & Boucard, T. (2006). Chronic

- aquatic environmental risks from exposure to human pharmaceuticals. *Science of the Total Environment*, 367, 23–41.
- Daughton, C. G. (2003). Cradle-to-cradle stewardship of drugs for minimizing their environmental disposition while promoting human health. I. Rationale for and avenues toward a green pharmacy. *Environmental Health Perspectives*, 111(5), 757–776.
- Fan, G., Zheng, X., Luo, J., Peng, H., Lin, H., Bao, M., Hong, L., & Zhou, J. (2018). Síntesis rápida de Ag/AgCl@ZIF-8 como fotocatalizador altamente eficiente para la degradación del acetaminofén bajo luz visible. *Chemical Engineering Journal*, 351, 782–790.
- Fent, K., Weston, A. A., & Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76, 122–159.
- Glaze, W. H. (1987). Drinking water treatment with ozone. *Environmental Science & Technology*, 21(3), 224–231.
- González Peña, O. I., López Zavala, M. Á., & Cabral Ruelas, H. (2021). Pharmaceuticals market, consumption trends and disease incidence are not driving the pharmaceutical research on water and wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2532.
- Ghosh, S., & Saha, S. (2015). Photocatalytic degradation of acetaminophen using TiO₂ under solar irradiation: Kinetics and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 262, 627–634.
- Hassan, M., Liu, Y., & Zhang, Q. (2024). Photocatalytic degradation of acetaminophen using ZnO/g-C₃N₄ nanocomposites under UV and visible light. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 108765.
- Heberer, T., Schmidt-Baumler, K., & Stan, H. J. (1998). Occurrence and distribution of organic contaminants in the aquatic system in Berlin: Part I: Drug residues and other polar contaminants in Berlin surface and groundwater. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 26(5), 272–278.
- Heberer, T. (2002). Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data. *Toxicol. Lett.*, 131, 309.
- Hermann, J. M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*, 53(1), 115–119.
- Jobling, S., Sheahan, D., Osborne, J. A., Matthiesen, P., & Sumpter, J. P. (1996). Inhibition of testicular growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to estrogenic alkylphenolic chemical. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 15(2), 194–202.
- Kabra, K., Chuadhary, R., & Sawhney, R. L. (2004). Treatment of hazardous organic and inorganic compounds through aqueous-phase photocatalyst: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43, 7683–7696.
- Khan, A. H. A., & Barros, R. (2023). Productos farmacéuticos en el agua: Riesgos para la vida acuática y estrategias de remediación. *Hidrobiología*, 2(2), 395–409.
- Kolpin, D., Furlong, E. T., Meyer, M. T., Thurman, E. M., Zaugg, S. D., & Barber, L. B. (2002). Pharmaceuticals, hormones and organic wastewater contaminants in US streams, 1999–2000: A national reconnaissance. *Environmental Science & Technology*, 36, 1202–1211.
- Kümmerer, K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment—A review—Part I. *Chemosphere*, 75, 417–434.
- Liu, F., Ying, G. G., Tao, R., Zhao, J. L., Yang, J. F., & Zhao, L. F. (2009). Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities. *Environmental Pollution*, 157, 1636–1642.
- Masoner, J. R., Kolpin, D. W., Furlong, E. T., Cozzarelli, I. M., & Gray, J. L. (2016). Landfill leachate as a mirror of today's disposable society: Pharmaceuticals and other contaminants of emerging concern in final leachate from landfills in the conterminous United States. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35, 906–918.
- Moctezuma, E., Leyva, E., Aguilar, C., Luna, R., Montalvo, C. (2012) Photocatalytic degradation of paracetamol: Intermediates and total reaction mechanism, *Journal of Hazardous Materials*, 243, 130-138,
- Mohammad, A., Singh, R., & Patel, D. (2025). Carbon-doped NASICON materials for visible-light-driven degradation of pharmaceuticals. *Chemical Engineering Journal*, 453, 142389.
- Molinari, R., Prillo, F., Loddò, V., & Palmisano, L. (2006). Heterogeneous photocatalytic degradation of pharmaceuticals in water by using polycrystalline TiO₂ and a nanofiltration membrane reactor. *Catalysis Today*, 118, 205–213.
- Mompelat, S., Le Bot, B., & Thomas, O. (2009). Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water. *Environment International*, 35, 803–814.
- Muambo, K. E., Kim, M.-G., Kim, D.-H., Park, S., & Oh, J.-E. (2024). Pharmaceuticals in raw and treated water from drinking water treatment plants nationwide: Insights into their sources and exposure risk assessment. *Water Research X*, 24, 100256.
- Nasr, O., Mohamed, O., Al-Shirbini, A.-S., & Abdel-Wahab, A.-M. (2019). Degradación fotocatalítica del paracetamol sobre TiO₂ cargado con Ag, Au y Pt utilizando luz solar. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*.
- Ortúzar, M., Esterhuizen, M., Olicón-Hernández, D. R., González-López, J., & Aranda, E. (2022). Pharmaceutical pollution in aquatic environments: A concise review of environmental impacts and bioremediation systems. *Frontiers in Microbiology*, 13, 869332.
- Pawłowska, B., & Biczak, R. (2024). Drugs in the

- environment – Impact on plants: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 111, 104557.
- Quinn, B., Gagné, F., & Blaise, C. (2008). An investigation into the acute and chronic toxicity of eleven pharmaceuticals (and their solvents) found in wastewater effluent on the cnidarian, *Hydra attenuata*. *Science of the Total Environment*, 389, 306–314.
- Qutob, M., Hussein, M. A., Alamry, K. A., & Rafatullah, M. (2022). A review on the degradation of acetaminophen by advanced oxidation process: Pathway, by-products, biotoxicity, and density functional theory calculation. *RSC Advances*, 12(29), 18373–18396.
- Ronderos-Lara, J. G., Saldarriaga-Noreña, H., Murillo-Tovar, M. A., Alvarez, L., Vergara-Sánchez, J., Barba, V., & Guerrero-Alvarez, J. A. (2022). Distribución y riesgo estrogénico de compuestos, hormonas y fármacos alquilfenólicos contenidos en agua y sedimentos naturales superficiales, Morelos, México. *Separaciones*, 9(1).
- Shuyi, W., Ryan, M., & Gunsch, C. K. (2008). Effects of pharmaceutically active compounds on a mixed microbial community originating from a municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science & Technology*, 42, 1091–1095.
- Snyder S. A., Westerhoff P., Yoon Y., Sedlak D. L. (2003), Pharmaceuticals, Personal Care Products and Endocrine Disrupters in Water: Implications for Water Industry, *Environ. Eng. Sci.*, 20, 5, 449-469.
- Tobajas, M., Belver, C., & Rodríguez, J. J. (2016). Degradación de contaminantes emergentes en agua bajo irradiación solar utilizando nuevas nanoarquitecturas de TiO₂-ZnO/arcilla. *Chemical Engineering Journal*.
- Vogna, D., Marotta, R., Napolitano, A., & d'Ischia, M. (2002). Advanced oxidation chemistry of paracetamol, UV/H₂O₂-induced hydroxylation/ degradation pathways and ¹⁵N-aided inventory of nitrogenous breakdown products. *Journal of Organic Chemistry*, 67, 6143–6151.
- Walters, E., McClellan, K., & Halden, R. U. (2010). Occurrence and loss over three years of 72 pharmaceuticals and personal care products from biosolids-soil mixtures in outdoor mesocosms. *Water Research*, 44, 6011–6020.
- Wilkinson, J. L., Boxall, A. B. A., Kolpin, D. W., Leung, K. M. Y., Lai, R. W. S., Galbán-Malagón, C., Adell, A. D., Mondon, J., Metian, M., Marchant, R. A., Bouzas-Monroy, A., Cuni-Sanchez, A., et al. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(8), e2113947119.
- Yang L., Liya E., Ray M. (2008) Degradation of paracetamol in aqueous solutions by TiO₂ photocatalysis. *Water Res.*, 42, 3480-3488.
- Yang, L., Yu, L., & Ray, M. (2009). Photocatalytic oxidation of paracetamol: dominant reactants,

intermediates, and reaction mechanisms. *Environ. Sci. Technol.*, 43 (2), pp. 460-465.

Fecha de recepción: 10 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 23 de octubre de 2025.

Análisis del desempeño mecánico de bloques compuestos con fibras de *Parmentiera edulis* (cuajilote) para aplicaciones en bioconstrucción

Muñoz Talango Dayana Guadalupe⁽¹⁾

Abatal Mohamed⁽¹⁾

Santiago de la Cruz Arlette Arizbe⁽²⁾

RESUMEN

El sector de la construcción convencional genera un alto impacto ambiental, derivado del elevado consumo energético y de las emisiones asociadas a la extracción, transformación y transporte de materiales. En este contexto, el desarrollo de alternativas sostenibles se presenta como una estrategia clave para mitigar dichos efectos y avanzar hacia una edificación más responsable. Este estudio tuvo como objetivo fabricar y caracterizar bloques de tierra comprimida (BTC) elaborados con suelo local estabilizado con cemento y reforzado con fibra natural de *Parmentiera aculeata* (cuajilote), una especie vegetal abundante en la región. Las muestras fueron moldeadas y curadas bajo condiciones controladas, y se evaluaron sus propiedades mecánicas y térmicas. Los resultados mostraron que los bloques reforzados alcanzaron resistencias a la compresión entre 0.7 y 3.6 MPa, valores que se ajustan a lo establecido por la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012 para uso no estructural. Los porcentajes de absorción de agua oscilaron entre 17.4 % y 25.7 %, considerados aceptables para materiales de albañilería no cocidos. Dichos valores confirman que la incorporación de fibras naturales mejora el desempeño mecánico de los bloques. En conjunto, el uso de suelo local y fibra de cuajilote favorece la economía circular, reduce la generación de residuos y promueve el aprovechamiento de recursos regionales. Esto posiciona a los eco-bloques desarrollados como una alternativa técnica, económica y ambientalmente

viable para la construcción sostenible en entornos urbanos y rurales.

Palabras clave

construcción, propiedades mecánicas, eco-bloques, fibra natural.

Abstract

The conventional construction sector has a significant environmental impact due to its high energy consumption and emissions from the extraction, processing, and transportation of materials. In this context, developing sustainable alternatives is a key strategy for mitigating these effects and transitioning to more responsible construction practices. This study aimed to manufacture and characterize compressed earth blocks (CEBs) made from local soil stabilized with cement and reinforced with the natural fiber of *Parmentiera aculeata* (cuajilote), a plant species that is abundant in the region. The samples were molded and cured under controlled conditions, and their mechanical and thermal properties were evaluated. The results showed that the reinforced blocks achieved compressive strengths between 0.7 and 3.6 megapascals (MPa), which comply with the Mexican standard (NMX-C-404-ONNCCE-2012) for non-structural use. Water absorption percentages ranged from 17.4% to 25.7%, considered acceptable for unfired masonry

⁽¹⁾Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Campus III, Av. Mundo Maya, C.P. 24153, Cd. del Carmen Campeche, México. ⁽²⁾ Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Michoacán; Antigua carretera a Pátzcuaro 8745, Sin Nombre, Indeco La Huerta, C.P. 58341, Morelia, Michoacán, México.

materials. These results confirm that incorporating natural fibers improves the blocks' mechanical performance. Overall, using local soil and cuajilote fiber promotes the circular economy, reduces waste generation, and encourages the use of regional resources. Thus, the eco-blocks developed are a technical, economic, and environmental alternative.

Keywords

construction, mechanical properties, eco-blocks, natural fiber.

Introducción

La arquitectura es el arte inevitable. Despiertos o dormidos, durante las 24 horas del día estamos en edificios, en torno a edificios, en los espacios definidos por ellos o en paisajes o ambientes creados por la mano del hombre (Roth, 1999). Sin embargo, la industria de la construcción enfrenta una problemática ambiental considerable, derivada de la degradación del suelo por la extracción de materias primas, las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de cemento que sitúan a la industria entre las más intensivas a nivel global, y quizá lo más crítico, la creciente generación de residuos (López Ruiz et al., 2020).

Organismos internacionales promueven la reducción del consumo de recursos y la adopción de hábitos sostenibles como acciones esenciales para mitigar el impacto ambiental global. En particular, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fomentan patrones de consumo y producción responsables, orientados a garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras (Aghimien et al., 2019). En concordancia con el Acuerdo de París, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha impulsado políticas dirigidas a mejorar la eficiencia energética, optimizar el uso de edificaciones existentes, promover la construcción de edificios de alto rendimiento, incorporar fuentes de energía renovable y avanzar hacia la descarbonización en la producción de materiales de construcción.

Es por ello que en los últimos años se ha promovido el desarrollo de soluciones innovadoras que integran los avances de la ciencia de materiales, orientadas a optimizar el desempeño y la sostenibilidad de las construcciones. Estas líneas de investigación constituyen un verdadero cambio de paradigma en el sector. Sin embargo, con el avance de las tecnologías emergentes también ha resurgido el interés por los métodos constructivos tradicionales

que emplean materiales naturales y de bajo impacto ambiental. Entre ellos destaca la construcción con tierra, una práctica ancestral que combina eficiencia, sostenibilidad y adaptabilidad, y que hoy se reconoce como una alternativa viable y con gran potencial para la arquitectura sostenible contemporánea (Tian et al., 2024).

La construcción con tierra es una de las técnicas más antiguas desarrolladas por la humanidad, permite edificar refugios funcionales utilizando materiales disponibles de manera local. En distintas regiones del mundo, es común encontrar edificaciones de tierra con diversas técnicas constructivas, frecuentemente combinadas con otros materiales tradicionales como la madera, la piedra, fibras naturales, e incluso con materiales modernos como el cemento y el acero. Además, la tierra es un material abundante que cumple con los principales requisitos de sostenibilidad, principalmente por su bajo impacto ambiental y sus destacadas propiedades higroscópicas, evidentes en las construcciones históricas en tierra. Dichas propiedades favorecen el confort térmico y la calidad del aire interior, lo que la convierte en un material idóneo para la edificación sostenible (Touré et al., 2017).

Entre las diversas técnicas de construcción con tierra, los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) se consideran actualmente entre las opciones más atractivas por su equilibrio entre desempeño mecánico y sostenibilidad. Los BTC representan una alternativa viable y ambientalmente responsable frente a los materiales de construcción convencionales, como los bloques cerámicos o de concreto, ya que su producción requiere menor consumo energético y genera una reducción significativa en las emisiones de CO₂ (Jesudass et al., 2020). En la actualidad, ha crecido el interés en el desarrollo de BTC reforzados con diferentes tipos de fibras naturales, incorporando materiales como el abacá, kenaf, bambú, yute, bagazo, fibra de palmera datilera y fibra de hoja de piña en la industria de la construcción (Hamada et al., 2023). Estas fibras destacan por ser ecológicas, económicamente accesibles y fácilmente disponibles, lo que las convierte en materiales altamente atractivos para aplicaciones sostenibles. Es por ello que la fibra natural del fruto de *Parmentiera aculeata* (cuajilote) surge como una alternativa prometedora por sus propiedades estructurales y su potencial como recurso natural renovable, alineándose con los principios de una construcción sostenible y de bajo impacto ambiental.

Parmentiera aculeata es una especie arbórea que se distribuye ampliamente en el sureste de

México, abarcando desde el sur de Tamaulipas hasta la Península de Yucatán, y desde Sinaloa hasta Chiapas, con presencia casi continua durante el año, a excepción de los meses de enero y febrero. Es altamente valorada en las localidades de la Península de Yucatán, donde es común encontrarla en áreas rurales, huertos familiares, patios e incluso en espacios urbanos. Conocida popularmente como “pepino kat” o “pepino de árbol”, también recibe denominaciones regionales como “cuajilote” o “guajilote”.

Su fruto destaca por su versatilidad, ya que posee aplicaciones tanto en la medicina tradicional, para el tratamiento de diversas afecciones, como en la gastronomía, donde es empleado como ingrediente en múltiples preparaciones culinarias. Estudios específicos sobre el fruto del cuajilote han revelado un alto contenido de fibra y compuestos lignocelulósicos. En particular, en la literatura denominada “Study of cellular architecture and micromechanical properties of cuajilote fruits (*Parmentiera edulis* D.C.) using different microscopy techniques” se analizó en detalle las propiedades micromecánicas del fruto, demostrando que la orientación de las fibrillas celulares puede influir positivamente en sus características mecánicas. Estos hallazgos sugieren un potencial prometedor

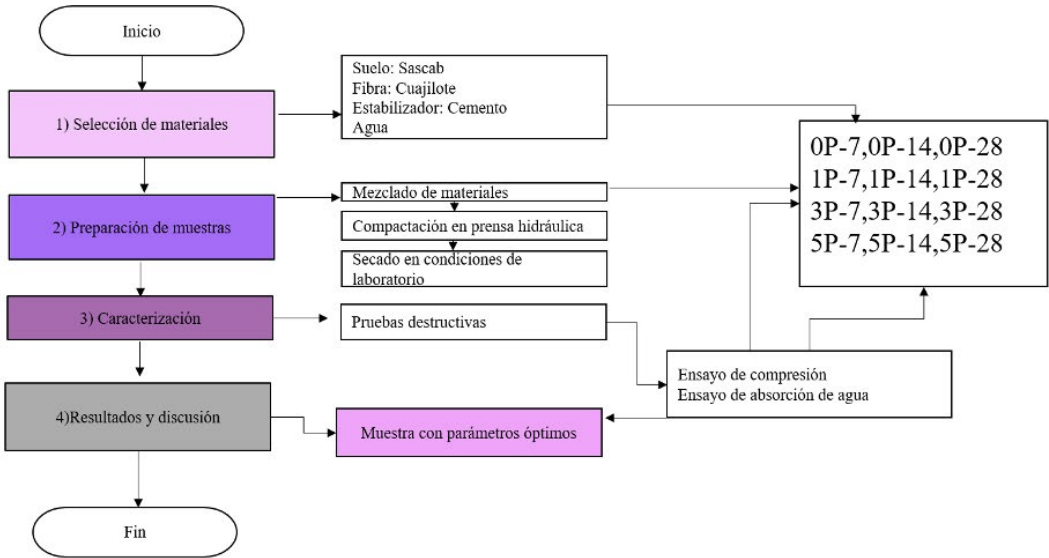
para su aplicación en el ámbito de la construcción y otros campos de la ingeniería de materiales (Vicente-Flores et al., 2021).

En este estudio propone evaluar los bloques de tierra comprimida (BTC) con suelo local, estabilizados con cemento y diferentes proporciones de fibra natural de *Parmentiera aculeata* (cuajilote), analizando su desempeño a 7, 14 y 28 días de curado. El objetivo es desarrollar un material que cumpla con los criterios estructurales establecidos por las normas mexicanas en cuanto a resistencia a la compresión y absorción de agua, además de evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental. Se espera que los resultados evidencien el potencial de estos eco-bloques como una alternativa sostenible para la construcción local y regional.

Metodología

En este apartado se presenta de manera detallada la metodología aplicada en esta investigación. A través de la Figura 1, se describen las etapas en las que se ha estructurado el estudio, acompañadas de una explicación clara y precisa de cada una de ellas. Esta sección proporciona una guía, permitiendo comprender cada etapa de la investigación.

Figura 1. Diagrama de metodología aplicada.



1) Preparación de los materiales

Se seleccionó como material base un suelo calizo característico de la península de Yucatán, ampliamente utilizado en la construcción local.

El sascab se presenta principalmente en forma de grava fina o arena limosa. En esta investigación, se empleó el suelo en estado seco, bajo condiciones ambientales normales, previamente tamizado para obtener partículas finas de suelo. Como agente

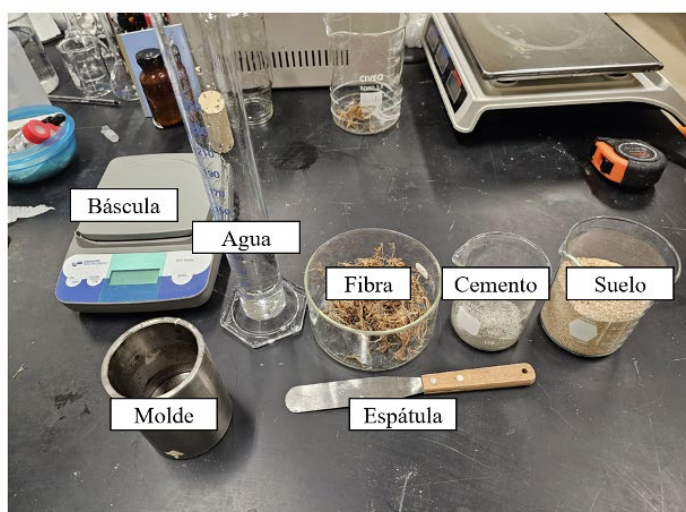
estabilizador se utilizó cemento. Como refuerzo complementario, se incorporó fibra natural de *Permentiera aculeata* (cuajilote), un recurso vegetal abundante en la región y actualmente considerado un residuo. Esta fibra se obtiene como subproducto del proceso de extracción del jugo del fruto, durante el cual la cáscara se seca al sol. Su aprovechamiento en materiales de construcción representa una alternativa sustentable, alineada con los principios de la economía circular y basada en procesos que no requieren energía eléctrica para su elaboración.

2) Preparación de muestras

La Figura 2 muestra los materiales utilizados en el proceso de preparación de las probetas, incluyendo los componentes y herramientas empleados en la elaboración de las mezclas. Primero se adecuó el suelo pasándolo por un tamiz de acero inoxidable

No. 14 (abertura de 1.40 mm; 0.0555") para garantizar una granulometría homogénea. La fibra natural seca se separó manualmente en hebras delgadas de ≤ 2 cm, empleándose proporciones del 1 %, 3 % y 5 % en masa. La dosificación de materiales (suelo, cemento, fibra y agua) se ajustó según el tipo de muestra y el porcentaje de refuerzo establecido. La mezcla se homogeneizó en etapas: primero se integraron los componentes secos (suelo y cemento), posteriormente se añadió la fibra y, finalmente, el agua de manera gradual hasta obtener una consistencia uniforme. La mezcla resultante se colocó en moldes previamente engrasados y se compactó bajo una presión ≤ 1 ton en una prensa hidráulica. Las probetas se secaban bajo condiciones ambientales controladas en el Laboratorio de Materiales Avanzados, manteniendo una temperatura entre 23–30 °C y una humedad relativa de 35–45 %.

Figura 2. Materiales y herramientas para el proceso de preparación de muestras.



3) Caracterización

Las muestras se evaluaron considerando dos factores: el porcentaje de fibra (0, 1%, 3% y 5%) y el tiempo de fraguado (7, 14 y 28 días). Las pruebas realizadas (Figura 3) incluyeron la resistencia a la compresión y la absorción de agua, con el propósito de analizar el comportamiento físico y mecánico de las muestras.

Las muestras fueron sometidas a pruebas mecánicas y físicas que incluyeron la evaluación de la resistencia a la compresión y la determinación de la absorción de agua. Antes de los ensayos, cada muestra se pesó en una balanza analítica de alta precisión (± 0.1 g, Denver Instrument DLT411) y se midió conforme

a la norma NMX-C-038-ONNCCE-2013 utilizando un vernier digital con precisión de ± 0.01 mm

Para el ensayo de resistencia a la compresión (Figura 3) se evaluó a los 3, 7 y 28 días de fraguado. Las pruebas se realizaron en una máquina universal de ensayos con capacidad de 2000 kN (Computer Control Electro-hydraulic Servo Universal Testing Machine, modelo WAW-300E, No. 011442), equipada con manómetro integrado. El procedimiento se llevó a cabo conforme a la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012, y se complementó con la NMX-C-036-ONNCCE, basada en la ASTM C-140-75, que establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión en materiales de construcción.

Figura 3. Ensayo de resistencia a la compresión.



Para finalizar, la prueba de absorción de agua (figura 3d) se realizó según las normas NMX-C-037-ONNCCE-2005 y NMX-C-036-ONNCCE para determinar la cantidad de agua absorbida por las muestras. Los especímenes fueron medidos y pesados para obtener su masa inicial, posteriormente

se secaron en horno a 100–110 °C durante 24 h hasta alcanzar masa constante, y posteriormente se sumergieron en agua a 17–23 °C por 24 h. Tras retirar el exceso de agua superficial, se registró la masa húmeda y se calculó el porcentaje de absorción total.

Figura 4. Ensayo de absorción de agua.



4) Resultados y discusión

Para analizar los resultados, se consideraron como variables el porcentaje de fibra de cuajilote (0, 1, 3 y 5 %) y el tiempo de curado (7, 14 y 28 días), con el objetivo de evaluar su influencia en las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de las muestras. Los

datos experimentales corresponden al promedio de tres réplicas por muestra (Figura 4). Se identificaron las tendencias asociadas al contenido de fibra y al tiempo de curado, comparando los resultados con materiales de referencia reportados en la literatura especializada.

Figura 5. Fotografía de las muestras y sus réplicas después del ensayo de resistencia a la compresión.



Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas físicas y mecánicas considerando el efecto del contenido de fibra y el tiempo de curado en el desempeño de los compósitos.

Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión mostró una disminución progresiva con el aumento del contenido de fibra, mientras que el tiempo de curado favoreció el desarrollo de resistencia en todas las formulaciones (Figura 6). El valor máximo se registró en la muestra sin fibra a los 28 días con 4.13 MPa, mientras que la mínima correspondió al 5% de fibra a los 7 días con 0.7 MPa.

En general, la incorporación de fibra redujo la resistencia inicial, aunque mejoró la ductilidad y cohesión del material, lo cual puede resultar ventajoso para aplicaciones donde se requiere mayor absorción de energía y tenacidad estructural.

Cabe señalar que las formulaciones con 3 % y 5 % de fibra no cumplen con la resistencia mínima a la compresión de 2.8 MPa establecida por la norma NMX-C-441-ONNCCE-2012 para materiales de uso no estructural. La resistencia a la compresión constituye un parámetro fundamental para evaluar la idoneidad de los bloques en aplicaciones de mampostería, ya que determina su capacidad para

soportar cargas y garantizar la estabilidad del elemento constructivo.

Estos resultados son coherentes con lo reportado en la literatura, donde los materiales reforzados con fibra de yute alcanzan una resistencia promedio de 6.7 ± 0.2 MPa (Hussain & Ali, 2019), mientras que aquellos elaborados con pulpa de papel presentan valores comprendidos entre 4.0 y 10.7 MPa (Muñoz et al., 2020). Estos antecedentes confirman que el porcentaje y tipo de refuerzo fibroso influyen de

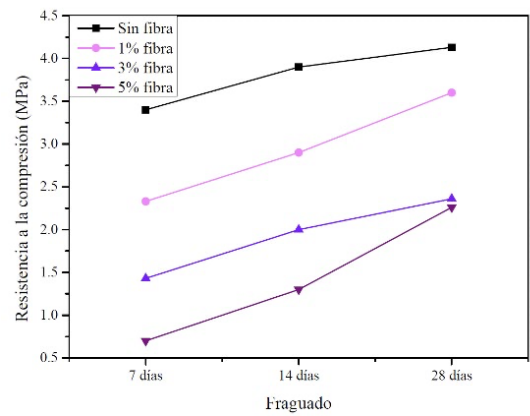


Figura 6. Gráfica resistencia a la compresión. En el eje X fraguado, el recuadro indica los porcentajes de fibra de cuajilote empleada en las muestras.

manera significativa en la resistencia mecánica del compuesto.

Ensayo de absorción de agua

Los porcentajes de absorción de agua oscilaron entre 17.4 % y 25.7 %, incrementándose con el porcentaje de fibra de cuajilote (Figura 7). Las muestras con 5 % de fibra registraron las mayores absorciones en todos los tiempos de curado, alcanzando 25.7 % a los 14 días, lo que refleja una mayor porosidad asociada a la incorporación del refuerzo vegetal. En contraste, las muestras sin fibra mostraron valores más bajos y estables (17–18 %). Cabe señalar que las formulaciones con 5 % de fibra superaron el límite máximo del 25 % establecido por la norma

entre absorción y resistencia. En otros estudios de absorción de agua donde emplean fibras de palma estabilizadas mediante tratamiento alcalino, se reportaron valores de absorción de agua entre 4.53 % y 5.26 % (Taallah & Guettala, 2016) significativamente inferiores a los obtenidos en este trabajo. Esta diferencia puede atribuirse al uso del agente estabilizante alcalino o al empleo de menores proporciones de fibra ($\approx$ 0.2 %). En contraste, investigaciones que emplean fibras de pastos marinos y paja han registrado valores considerablemente más altos, de hasta 365 % y 293 %, respectivamente (Olacia et al., 2020), lo que evidencia que la composición química y la estructura superficial de las fibras influyen de manera determinante en la capacidad de retención de agua del material.

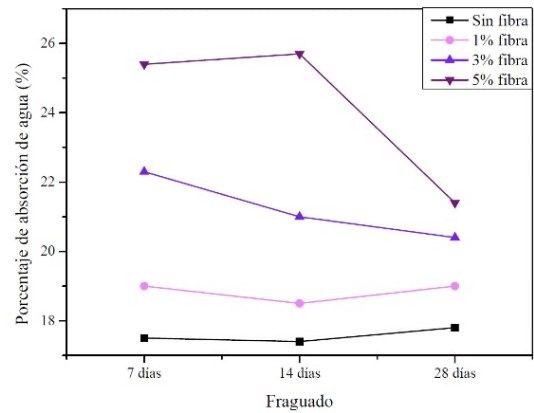


Figura 7. Gráfica de porcentaje de absorción de agua. En el eje X fraguado, el recuadro indica los porcentajes de fibra de cuajilote empleada en las muestras.

NMX-C-441-ONNCCE-2012 para materiales de uso no estructural, mientras que las de 0 %, 1 % y 3 % de fibra permanecieron dentro del rango permitido, manteniendo un equilibrio adecuado

Conclusiones

En resumen, los resultados obtenidos muestran que la resistencia a la compresión aumenta progresivamente con el tiempo de fraguado en todas las formulaciones, evidenciando el desarrollo continuo de la matriz cementante. Sin embargo, la incorporación de fibra de cuajilote tiende a disminuir los valores de resistencia en comparación con la muestra sin refuerzo. Entre las mezclas con fibra, el 1 % presenta el mejor desempeño mecánico, alcanzando alrededor de 3.5 MPa a 28 días, lo que sugiere una adecuada compatibilidad entre la fibra y la matriz. En concentraciones más altas (3 % y 5 %), la resistencia disminuye notablemente, posiblemente por el incremento en la porosidad y la dispersión irregular de las fibras dentro del material. En cuanto a la absorción de agua, se observa un incremento con el aumento del contenido de fibra, atribuible a la naturaleza higroscópica y estructura porosa del refuerzo vegetal. La formulación con 1 %

Tabla 1. Valores óptimos de propiedades en función del contenido de fibra.

Propiedad evaluada	Criterio de optimización	Porcentaje óptimo de fibra	Justificación
Resistencia a la compresión	Mayor resistencia mecánica	1 %	Registra la mayor resistencia (~3.5 MPa a 28 días) entre las muestras con fibra.
Absorción de agua	Menor porcentaje de absorción	1 %	Exhibe la menor absorción (~18–19 %), favoreciendo la durabilidad del material.
Desempeño global	Equilibrio entre propiedades físicas y mecánicas	1 %	Combina una resistencia aceptable con absorción de agua moderada.

de fibra mostró los valores más bajos de absorción ($\approx 18\text{--}19\%$), manteniéndose dentro de rangos aceptables para materiales de bioconstrucción. En conjunto, estos resultados indican que el 1 % de fibra de cuajilote ofrece el mejor equilibrio entre resistencia mecánica y durabilidad, siendo la proporción más recomendable para el desarrollo de bloques ecológicos con un desempeño estructural adecuado (tabla 1).

Estos resultados confirman que los BTC reforzados con fibras de cuajilote presentan un potencial viable como material de construcción sostenible a nivel local, especialmente en viviendas sociales y ecológicas, siempre que se consideren sus limitaciones para aplicaciones estructurales.

Como recomendaciones de esta investigación:

Evaluar porcentajes menores al 3 % de fibra para determinar el límite inferior que preserve la cohesión y mejore la compactación del bloque.

Probar diferentes estabilizadores (cal, yeso, cenizas volantes) para optimizar la durabilidad y resistencia mecánica.

Ampliar los tiempos de curado (hasta 112 días) para analizar la evolución microestructural y el desarrollo de propiedades físico-mecánicas.

Aplicar tratamientos químicos a la fibra (alcalinización o silanización) para mejorar la adherencia fibra-matriz y reducir la absorción de humedad.

Agradecimientos

D. G. Muñoz agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca nacional otorgada durante la realización de la Maestría en Ingeniería de Materiales y Energía (MIME) en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR). Agradece de manera especial al Dr. Mohamed Abatal por su valiosa guía y apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Así como al Dr. Óscar May, Dra. Adriana Franco, Dr. Fernando Cervantes, Mtro. Rogelio Villamonte y a todas las personas que contribuyeron con su conocimiento y colaboración en la obtención de los datos experimentales. Finalmente, agradece a la Revista Acalán por el espacio brindado para la difusión de este trabajo.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este artículo.

Referencias

- Aghimien, D. O., Oke, A. E., & Aigbavboa, C. (2019). Environmental Sustainability: Impact of Construction Activities. <https://www.researchgate.net/publication/335831057>
- Greenberger D., H. K. (2009). Compendium of Quantum Physics. In Compendium of Quantum Physics. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70626-7>
- Hamada, H. M., Shi, J., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., Yousif, S. T., & Kaplan, G. (2023). Application of natural fibres in cement concrete: A critical review. *Materials Today Communications*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105833>
- Hussain, T., & Ali, M. (2019). Improving the impact resistance and dynamic properties of jute fiber reinforced concrete for rebars design by considering tension zone of FRC. *Construction and Building Materials*, 213, 592–607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.036>
- Jesudass, A., Gayathri, V., Geethan, R., Gobirajan, M., & Venkatesh, M. (2020). Earthen blocks with natural fibres - A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6979–6986. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.434>
- López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 248). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>
- Muñoz, P., Letelier, V., Muñoz, L., & Bustamante, M. A. (2020). Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119314>
- Nouemssi, G. A., Ntack, G. E., Mbozo'O, M. N., & Djeumako, B. (2023). Thermal Properties of Earth Bricks Stabilised with Cement and Sawdust Residue Using the Asymmetrical Hot-Plane Method. *Open Journal of Applied Sciences*, 13(11), 1910–1934. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2023.1311151>
- Olacia, E., Pisello, A. L., Chiodo, V., Maisano, S., Frazzica, A., & Cabeza, L. F. (2020). Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization. *Construction and Building Materials*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>
- Roth, L. M. (1999). Entender la arquitectura: Sus elementos, historia y significado.
- Saghrouni, Z., Baillis, D., Naouar, N., Blal, N., & Jemni,

- A. (2019). Thermal properties of new insulating juncus maritimus fibrous mortar composites/ experimental results and analytical laws. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/app9050981>
- Taallah, B., & Guettala, A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>
- Tian, Q., Zhou, J., Hou, J., Zhou, Z., Liang, Z., Sun, M., Hu, J., & Huang, J. (2024). Building the future: Smart concrete as a key element in next-generation construction. In *Construction and Building Materials* (Vol. 429). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136364>
- Touré, P. M., Sambou, V., Faye, M., Thiam, A., Adj, M., & Azilinon, D. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). *Journal of Building Engineering*, 13, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.012>
- Vicente-Flores, M., Güemes-Vera, N., Chanona-Pérez, J. J., Perea-Flores, M. de J., Arzate-Vázquez, I., Quintero-Lira, A., & Sánchez-Fuentes, C. E. (2021). Study of cellular architecture and micromechanical properties of cuajilote fruits (*Parmentiera edulis* D.C.) using different microscopy techniques. *Microscopy Research and Technique*, 84(1), 12–27. <https://doi.org/10.1002/jemt.23559>

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 30 de octubre de 2025.

Catalizadores obtenidos por síntesis verde: aplicaciones en fotocatalisis. Una breve revisión.

Arias Mateo María Cruz⁽¹⁾
Aguilar Ucán Claudia Alejandra⁽¹⁾
Montalvo Romero Carlos⁽¹⁾
Rodas Hernández José Eduardo⁽¹⁾

RESUMEN

La presencia de contaminantes orgánicos en los cuerpos de agua resistentes a la degradación por métodos convencionales, ha propiciado la aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación y dentro de ellas la fotocatalisis heterogénea juega un papel muy importante, se trata de un proceso mediante el cual se ha conseguido la degradación de tintes, productos farmacéuticos y compuestos fenólicos a partir de semiconductores, en presencia de luz ultravioleta y/o luz visible; sin embargo, en esta área se estudia la implementación de alternativas sostenibles para la producción de materiales catalíticos, lo que ha llevado a desarrollar la síntesis verde como una estrategia que minimiza el impacto ambiental y reduce el uso de sustancias tóxicas, en el contexto de la química verde. En este trabajo se presenta una revisión sobre los avances recientes en la obtención de catalizadores mediante síntesis ecológica, principalmente TiO_2 y ZnO y su aplicación en procesos fotocatalíticos, resaltando el sustrato biológico empleado y su eficiencia en la degradación de contaminantes. Este método se basa en el uso de extractos vegetales, microorganismos y biomasa residual como agentes reductores y estabilizantes naturales, capaces de sustituir los reactivos químicos convencionales y promover la formación de nanopartículas con propiedades morfológicas y ópticas controladas.

A partir de la revisión bibliográfica, se logró identificar tendencias actuales hacia el uso de especies vegetales con alto contenido de

compuestos fenólicos, que favorecen la nucleación de nanopartículas metálicas. Asimismo, se observó que los catalizadores obtenidos presentan eficiencias de degradación superiores al 80% en tiempos relativamente cortos (30–180 min), para los estudios analizados dentro de esta investigación. La implementación de la síntesis verde no solo permite obtener materiales funcionales con alta estabilidad y actividad fotocatalítica, sino que también contribuye a cumplir los principios de la química verde, optimizando la energía y los recursos empleados.

Palabras clave

síntesis verde, fotocatalisis, nanopartículas, sostenibilidad

Abstract

The presence of persistent organic pollutants in wastewater, which resist degradation by conventional methods, has led to the application of advanced oxidation technologies and within them heterogeneous photocatalysis plays a very important role. It is a process through which the degradation of dyes, pharmaceutical products and phenolic compounds has been achieved from semiconductors and UV light and/or Visible light; However, in this area the implementation of sustainable alternatives for the production of catalytic materials is studied, which has led to the development of green synthesis

⁽¹⁾Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56 No. 4 Esq. Av. Concordia, Col. Benito Juárez C.P. 24180, Cd. del Carmen Campeche, México.

as a strategy that minimizes the environmental impact and reduces the use of toxic substances, in the context of green chemistry. This work presents a review of recent advances in obtaining catalysts through ecological synthesis, mainly TiO_2 and ZnO . This method is based on the use of plant extracts, microorganisms and residual biomass as natural reducing and stabilizing agents, capable of replacing conventional chemical reagents and promoting the formation of nanoparticles with controlled morphological and optical properties.

From the bibliographic review, it was possible to identify current trends towards the use of plant species with high content of phenolic compounds, which favor the nucleation of metal nanoparticles. Likewise, it was observed that the catalysts obtained have degradation efficiencies greater than 80% in relatively short times (30–180 min), for the studies analyzed within this research. The implementation of green synthesis not only allows us to obtain functional materials with high stability and photocatalytic activity but also contributes to complying with the principles of green chemistry, optimizing the energy and resources used.

Keywords

green synthesis, photocatalysis, nanoparticles, sustainability

Introducción

En los últimos años, la industrialización ha avanzado a pasos agigantados, hecho que aunado al crecimiento exponencial de la población y la explotación irracional de los recursos naturales, ha traído consigo el aumento en la cantidad de residuos liberados al entorno, lo que representa un riesgo para la salud, así como para el medio ambiente. Derivado de todas estas problemáticas ambientales, surge la necesidad de contar con estrategias más sostenibles dentro de la química moderna, lo que resalta la participación de investigadores en soluciones más eficientes y amigables con el medio ambiente para abordar y regular con éxito las problemáticas socioambientales.

Cabe resaltar que dentro de la problemática de la contaminación ambiental, se exploran también nuevas tecnologías aplicables a la descontaminación de aguas residuales industriales principalmente procedentes de industrias farmacéutica y textil, entre otras; donde los procesos avanzados de oxidación son muy utilizados por su capacidad para producir especies altamente reactivas que permiten

la degradación de los contaminantes orgánicos persistentes. En esta clasificación de procesos se sitúa la fotocatalisis heterogénea que se caracteriza por su alta eficiencia, bajo impacto ambiental y operación con radiación solar (Alfaro et al., 2025). En este contexto, los semiconductores más estudiados son el TiO_2 , ZnO , CeO_2 y SnO_2 debido a sus características como altas áreas superficiales, tamaño de partícula y a sus propiedades ópticas, químicas y eléctricas que los hacen activos para este proceso (Suhaimi et al., 2025).

Los catalizadores sólidos empleados en fotocatalisis heterogénea son obtenidos a partir de distintas técnicas, donde los métodos más comunes son sol – gel, deposición química de vapor, deposición electroquímica, cristalización hidrotérmica y precipitación química. Estos procesos tienen en común altos costos, requieren altas temperaturas y presiones, así como productos químicos nocivos para que se lleven a cabo (Verma et al., 2022).

En este sentido y considerando que la industria química libera más residuos peligrosos al medio ambiente que cualquier otro sector industrial (Warner et al., 2004), se exploran alternativas como la química verde que busca minimizar los impactos ambientales ocasionados por los procesos químicos mediante la disminución de los reactivos químicos, utilización de fuentes renovables y métodos que disminuyan el consumo energético, evitando en mayor medida el desperdicio o uso indiscriminado de materias primas no renovables, así como la utilización de materiales peligrosos en la fabricación de otros componentes (Rodríguez Ortiz et al., 2021).

Anastas et al. (1998) establecieron los 12 principios de la química verde, orientados a disminuir la generación de residuos, sustituir reactivos tóxicos, emplear disolventes seguros y maximizar la eficiencia energética de los procesos. De estos principios, deriva la noción de síntesis verde, entendida como el conjunto de procedimientos de obtención de compuestos químicos, materiales o nanomateriales que cumplen con criterios de sostenibilidad ambiental, seguridad y eficiencia (Del Carmen & Serrano, s.f.). Debido a la gran biodiversidad de las plantas, la síntesis verde se ha convertido en un tema de interés en todo el mundo con diferentes especies de plantas exploradas recientemente y evaluadas para la síntesis de nanopartículas (Fall et al., 2019), lo que representa un área de oportunidad en la fotocatalisis ya que en la síntesis de los semiconductores pueden implementarse satisfactoriamente.

De acuerdo con Verma et al. (2022), la síntesis

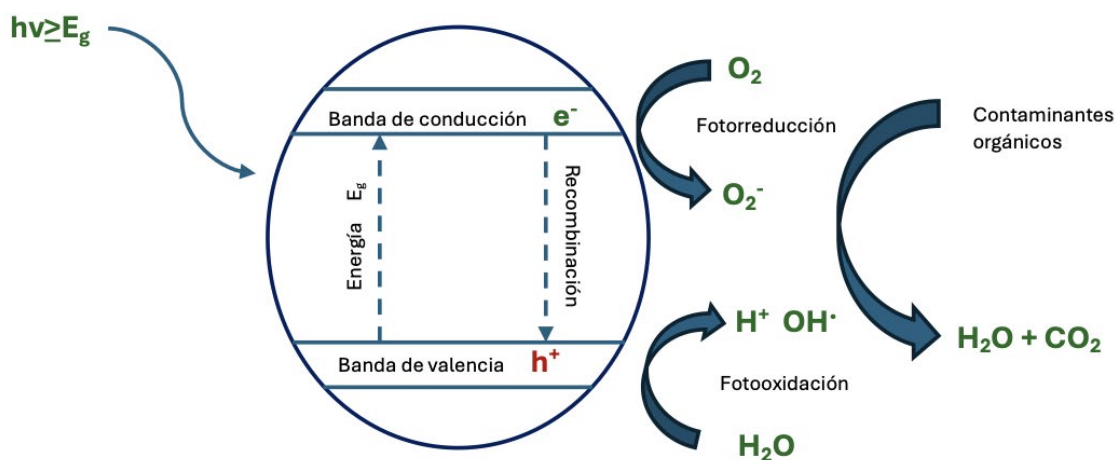
verde en la obtención de materiales se basa en la utilización de agentes reductores y estabilizantes de origen biológico, como extractos de plantas (hojas, raíces, frutas o semillas), microorganismos o metabolitos naturales, los cuales sustituyen los reactivos químicos convencionales. De esta forma, se logra obtener nanopartículas con menor toxicidad y con propiedades funcionales mejoradas.

Por otra parte, Zuliani y Cova (2021) presentan que la síntesis verde de fotocatalizadores no solo busca la reducción del impacto ambiental, sino además obtener materiales con características fotocatalíticas activas bajo luz visible, ampliando el rango de aplicaciones energéticas y ambientales. Ambos autores analizan la síntesis de estos materiales desde dos enfoques distintos: el primero en cuanto a desarrollar procesos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente y el otro, en cuanto a la utilización de biomasa o residuos como fuentes de

productos químicos.

En el área de la fotocatalisis heterogénea, el uso de catalizadores obtenidos por rutas verdes ha cobrado gran relevancia para el tratamiento de contaminantes orgánicos persistentes (colorantes, fármacos, pesticidas), así como en procesos energéticos como la producción de hidrógeno o la reducción de CO_2 . La fotocatalisis es un proceso cuyo principio o mecanismo de acción se basa en la excitación de un semiconductor bajo irradiación de luz UV y/o visible, como resultado se generan un agujero de banda de valencia junto a un electrón fotoexcitado en la banda de conducción, estos pares son capaces de iniciar reacciones de oxidación en la superficie del catalizador, debido a que conducen a la formación de radicales hidroxilos y superóxidos capaces de degradar contaminantes orgánicos persistentes presentes en el agua (Cherif et al., 2023), en la Figura 1 se ilustra el mecanismo de acción de la fotocatalisis, tomando como semiconductor el ZnO .

Figura 1. Mecanismo general de la fotocatalisis heterogénea. Adaptado de Síntesis verde de materiales nanoestructurados de ZnO en la degradación de contaminantes orgánicos por medio de la fotocatalisis heterogénea, (Rodríguez Ortiz et al., 2021), Revista de Ciencias Tecnológicas Volumen 4(4): 299-313



La integración de métodos de síntesis verde en la preparación de estos semiconductores no solo mejora su compatibilidad ambiental, sino que también puede influir favorablemente en sus propiedades estructurales, morfológicas y ópticas y por ende, en su desempeño fotocatalítico (Mancuso & Iervolino, 2022).

En este sentido, la combinación de los principios de la química verde con la ingeniería de materiales fotocatalíticos abre una vía prometedora hacia el desarrollo de tecnologías limpias para la purificación de agua, aire y generación de energía renovable. Por todo lo anteriormente planteado, el presente

artículo de revisión tiene como objetivo analizar los avances recientes en la obtención de catalizadores mediante métodos de síntesis verde y su aplicación en procesos fotocatalíticos, resaltando el sustrato biológico empleado y su eficiencia en la degradación de contaminantes.

Métodos

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo documental, con base en la revisión y análisis de la literatura científica reportada y relacionada con la síntesis verde de catalizadores sólidos y su aplicación en procesos fotocatalíticos.

Se realizó un análisis del resultado de la búsqueda bibliográfica sobre la síntesis verde de catalizadores con aplicaciones fotocatalíticas. La búsqueda se llevó a cabo en un periodo comprendido de 2015 a 2025, de acuerdo con las palabras clave síntesis verde, catalizadores verdes, materiales sostenibles, fotocatalizadores y fotocatalisis heterogénea. Se realizó la búsqueda de artículos en inglés en plataformas de publicación y editoriales de acceso abierto, tales como *ScienceDirect*, MDPI, *SpringerOpen*, *ACS Omega* y *Google Scholar*.

En cada artículo encontrado se exploró la siguiente información: Tipo de catalizador sintetizado, fuente o sustrato biológico utilizado, técnicas de caracterización empleadas, aplicación fotocatalítica y eficiencia reportada.

La información recolectada se organizó en tablas, lo que permitió identificar tendencias recientes, ventajas y áreas de oportunidad en el campo de la síntesis verde de semiconductores con aplicaciones fotocatalíticas.

Resultados

Métodos de síntesis tradicionales

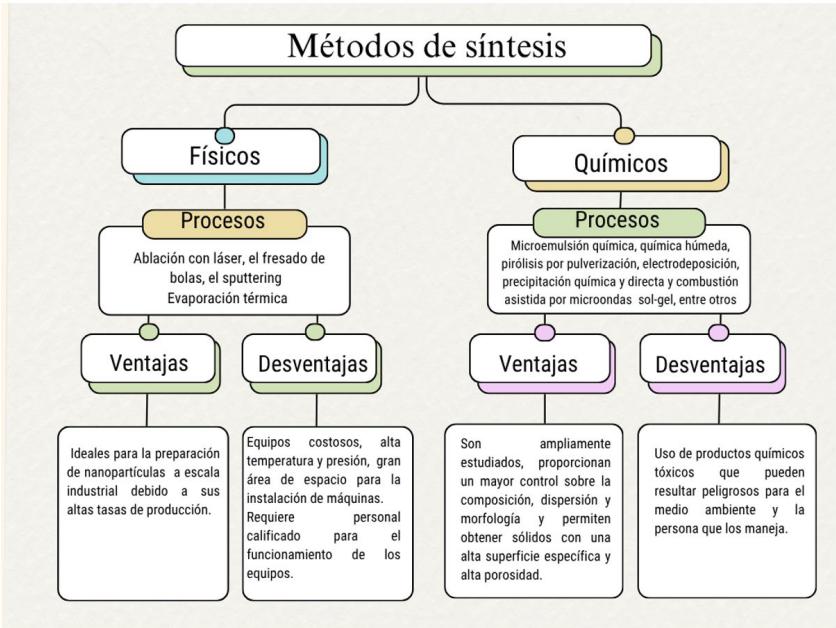
Las nanopartículas pueden sintetizarse por métodos físicos, químicos y ecológicos. Los métodos químicos que tradicionalmente se utilizan para la síntesis de catalizadores se basan en disolver

precursores como sales metálicas de nitratos o cloruros, controlar las condiciones de nucleación y crecimiento, depositarlos en soportes, secarlos y calcinarlos. Los métodos físicos implican técnicas sin reactivos químicos en cantidades significativas. Mientras los métodos químicos, como sol – gel, coprecipitación o hidrotermal, permiten un mayor control sobre la composición, dispersión y morfología, los físicos suelen ser más simples, menos dependientes de disolventes y más fáciles de escalar, aunque con restricciones en homogeneidad, distribución del componente activo y, a menudo, necesidad de temperaturas altas o tratamientos posteriores.

Los métodos basados en soluciones conducen inevitablemente a la producción de una gran cantidad de residuos de disolventes, algunos métodos de química húmeda, que implican múltiples pasos, a menudo se consideran laboriosos y, eventualmente, difíciles de ampliar para una formulación dada del material catalítico; otros requieren mucha energía; por lo que se hace necesario el desarrollo de procesos más amigables con el medio ambiente, lo cual es la tendencia en la investigación hacia la preparación de materiales por procesos de síntesis verde (Amrute et al., 2021). En la Figura 2, se presentan otras problemáticas asociadas a los procesos de síntesis físicos y químicos.

Con la finalidad de disminuir el uso de productos químicos nocivos, que repercuten negativamente

Figura 2. Métodos de síntesis físicos y químicos de nanopartículas. Elaboración propia con información de: (Agarwal et al., 2017; Mutukwa et al., 2024; Verma et al., 2022).



en el medio ambiente y en los organismos vivos, se deben desarrollar métodos ecológicos y sostenibles (Bognár et al., 2022).

Síntesis verde de nanopartículas

La química verde ha sido definida por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos como “un área de química, ingeniería química y/o campos relacionados en donde se reducen o eliminan la utilización o creación de sustancias peligrosas tóxicas”. La síntesis ecológica de nanopartículas conlleva la utilización de plantas, microorganismos o algas; con esta tecnología se elimina la necesidad de materias primas tóxicas, se minimizan la producción de productos tóxicos y también se disminuye la cantidad de residuos generados como resultado del proceso de síntesis de las nanopartículas (Mutukwa et al., 2024).

La elección de una sustancia estabilizadora segura, un agente reductor efectivo y un disolvente respetuoso con el medio ambiente son los tres requisitos cruciales para la preparación de nanopartículas (Shahzadi et al., 2025).

De acuerdo con Rodríguez et al. (2021), los semiconductores y catalizadores más estudiados en el periodo de 2016 a 2020 fueron el TiO_2 y ZnO , dado que degradan una amplia gama de contaminantes orgánicos desde el aire hasta las aguas residuales; sin embargo, el enfoque que se le dará en este trabajo será además de la síntesis verde, su aplicación en el área de la fotocatálisis.

Algunas de las características significativas del TiO_2 y el ZnO son:

- El ancho de banda y las energías de unión de excitación de ZnO y TiO_2 son grandes e iguales a 3.3 eV y 60 meV, para el ZnO y 3.1 eV y 53 meV para el TiO_2 .
- La longitud de onda para la actividad fotocatalítica se sitúa en el rango UV.
- Magnífica absorción de luz de los rayos UV a regiones visibles con ligeras modificaciones en sus estructuras químicas.

Se han empleado diferentes metodologías para la síntesis del TiO_2 y ZnO (Ghamarpoor et al., 2024).

Según la literatura, un método cautivador para la síntesis verde de fotocatalizadores es la reducción, así como la estabilización de iones metálicos utilizando diferentes extractos de plantas con

alto contenido de polifenoles, o más en general de fitoquímicos. Cabe mencionar que cuando se utilizan extractos vegetales para producir materiales con fines fotocatalíticos, la luz solar se vuelve la fuente de energía utilizada para la producción de fotoquímicos y la activación del fotocatalizador.

El dióxido de titanio (TiO_2) tiene características muy particulares que lo han colocado como uno de los catalizadores más utilizado en fotocatálisis heterogénea con la finalidad de remediación ambiental. Tiene tres estructuras cristalinas, el rutilo, la anatasa y la brookita; de aquí que el rutilo con un ancho de banda de 3 eV puede absorber una porción más grande del espectro solar en comparación con la anatasa y permitirle operar de manera más efectiva bajo irradiación de luz visible. Esta característica es particularmente beneficiosa para aplicaciones a gran escala donde la dependencia de la luz solar natural puede mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos (Abd El-Lateef et al., 2024).

A continuación se describe el proceso de síntesis verde del TiO_2 :

Preparación de extracto vegetal

Las hojas frescas se lavan minuciosamente y se procede a cortarlas en rodajas finas, se colocan en agua destilada y se ponen a hervir. Posteriormente, el extracto de la planta se filtra y está listo para ser utilizado, o bien, se puede almacenar a baja temperatura para ser utilizado más adelante (Verma et al., 2022).

Nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2)

Algunos de los precursores que pueden ser utilizados para sintetizar nanopartículas de TiO_2 son: TTIP (isopropóxido de tetratitanio), TiCl_4 , $\text{TiO}(\text{OH})_2$ (ácido metatitánico) y TiOSO_4 (oxisulfato de titanio). Dependiendo de la aplicación, las partículas de TiO_2 se disuelven en etanol o agua destilada. A continuación, el extracto obtenido anteriormente se añade a la mezcla, gota a gota; se agita continuamente y en cuanto se forman las nanopartículas. Después de eso, la solución se agitó continuamente a una temperatura adecuada. La aparición de NPs provoca un cambio en el color de la solución.

Finalmente, el material obtenido se filtra, se lava con agua destilada, se seca y se calcina a una temperatura que oscila entre 400 y 800 °C para eliminar el exceso de grupos orgánicos (Verma et al., 2022).

Para esta investigación tienen relevancia los procesos de síntesis verde de catalizadores que serán utilizados con fines fotocatalíticos; sin embargo, es importante mencionar que en la Tabla 1 se presentan datos de la síntesis de nanopartículas en las que el autor presenta la síntesis de las nanopartículas, aunque no especifica su aplicación.

En la Tabla 2 se presentan aquellas que reportan resultados con fines fotocatalíticos, señalando el contaminante degradado, así como la eficiencia y el tiempo de degradación; con lo que se resalta que el catalizador obtenido por esta vía posee propiedades que lo activan para ser utilizados en fotocátalisis heterogénea.

Tabla 1. Síntesis de nanopartículas de catalizadores obtenidas a partir síntesis ecológica.

Tipo de catalizador	Fuente del metal	Sustrato biológico	Referencia
ZnO	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mimosa púdica	(Balogun et al., 2020)
TiO ₂	$\text{C}_6\text{-H}_{18}\text{N}_2\text{O}_8\text{Ti}$	Extracto natural de Citrus sinensis	(Fall et al., 2019)
Ag/SnO	$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Extracto de raíz de jengibre	(Tiki et al., 2024)

Tabla 2. Síntesis de nanopartículas de catalizadores obtenidas por síntesis ecológica con aplicación en fotocátalisis.

Tipo de catalizador	Fuente del metal	Sustrato biológico	Proceso fotocatalítico	Referencia
ZnO	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Licania tomentosa	Reporta aprox. 79% de degradación de tinte violeta cristalina, en un tiempo de 120 minutos.	(Thiam et al., 2025)
Ag/TiO ₂	AgNO ₃ y nanopartículas de TiO ₂ P-25	Extracto de hongos	Reporta una degradación de 83.64% de Carmin G y 82.46% de ciprofloxacino en un tiempo de 300 minutos.	(Abd El-Lateef et al., 2024)
ZnO	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	extractos de hojas de <i>Withania coagulans</i>	Reporta degradación del 99% de Rodamina B en un tiempo de 30 minutos.	(Maher et al., 2023)
Ag/ZnO	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Extracto de papa	Reporta degradación del 96% de azul de metileno en 80 minutos.	(Alharthi et al., 2020)
Er/ZnO	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	<i>Mangifera indica</i>	Reporta degradación del 99.7% de azul de metileno, 81.2% de eosina amarilla y 52.3% de ibuprofeno en 120 minutos.	(Silva et al., 2024)
ZnO	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	Salvia hispánica	Reporta degradación superior al 98% de diclofenaco sódico, p-nitrofenol en 180 minutos.	(Ounis Dkhil et al., 2025)
ZnO		Extracto de hojas de <i>Allium caliphalum</i>	Reporta degradación de 74% de naranja de metilo en 140 minutos.	(Abdulqodus et al., 2025)
Cu/ZnO	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Extracto de Eichhornia crassipes	Reporta el 89% de degradación de azul de metileno en 100 minutos.	(Lemecho et al., 2022)
Ag/TiO ₂	TiO ₂	Extracto de cáscara de Citrus sinensis	Reporta 98 – 99% de degradación de Rodamina B en un tiempo de 40 minutos.	(Narh et al., 2024)
ZnO	$(\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$	Extracto de hoja de Aloe vera	Reporta 83.4% de degradación de azul de metileno en 100 minutos	(Maher et al., 2023)

Con base en la información presentada en la Tabla 1 donde se muestran tres catalizadores obtenidos y caracterizados y en la Tabla 2, donde puede apreciarse además la aplicación fotocatalítica, puede observarse que los catalizadores obtenidos mediante síntesis verde muestran una alta eficiencia en la degradación de contaminantes, alcanzando porcentajes superiores al 70 % en la mayoría de los casos y, en algunos, valores cercanos al 99 %. Esto demuestra que los extractos ecológicos, además de sustituir y/o disminuir la utilización de reactivos tóxicos, pueden actuar como agentes reductores y estabilizantes efectivos, permitiendo la formación de nanopartículas con propiedades adecuadas para su uso en fotocatalisis.

Las técnicas de caracterización más empleadas, como DRX, SEM, FT-IR y UV-Vis, confirman que los materiales obtenidos por rutas verdes poseen propiedades comparables con las obtenidas mediante métodos químicos convencionales. Lo más importante es que estos procedimientos requieren menos energía y no generan residuos peligrosos, lo que los hace más sostenibles; sin embargo, aún existen desafíos por atender, como la necesidad de escalar los procesos a nivel industrial. Aun con estas limitaciones, la síntesis verde representa una alternativa real y prometedora para la producción de catalizadores activos bajo luz visible, impulsando el desarrollo de tecnologías más limpias, eficientes y alineadas con los principios de la química verde.

Conclusiones

Los procesos de síntesis verde son una alternativa muy interesante porque buscan reducir la cantidad de residuos generados, disminuir el consumo de energía y aprovechar mejor las materias primas en la elaboración de catalizadores. Todo esto ayuda a que los procesos sean cada vez más sostenibles y amigables con el medio ambiente; sin embargo, al hacer la transición de los métodos tradicionales a los métodos de tecnología verde, es importante asegurarse de que realmente se esté logrando una reducción del impacto ambiental y no solo un cambio en los materiales o condiciones de trabajo.

Hablar de química verde implica cumplir con principios que aseguren que los procesos sean más limpios, seguros y eficientes. En este sentido, aplicar la síntesis verde en la preparación de catalizadores para procesos fotocatalíticos abre una gran oportunidad, ya que permite obtener materiales activos y estables mediante rutas más simples y menos contaminantes. De esta forma, la fotocatalisis no solo se vuelve una herramienta para tratar contaminantes, sino también un ejemplo de

cómo la ciencia puede avanzar hacia un desarrollo más responsable y sostenible.

Declaración de conflicto de interés

Todos los autores declaramos que no tenemos conflicto de intereses

Referencias

- Abd El-Lateef, H. M., Zeng, C. Q., Khalaf, M. M., & Mohamed, I. M. A. (2024). Green Synthesis of Silver-Incorporated Rutile TiO₂ for Enhanced Photocatalytic Degradation of Ciprofloxacin and Carmine G Dye Pollutants. *Catalysts*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/catal14120904>
- Abdulqodus, A. N., Abdulrahman, A. F., Mostafa, S. H., Kareem, A. A., Hamad, S. M., Ahmed, S. M., Almehiere, M. A., & Shaikhah, D. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles: effect of pH on morphology and photocatalytic degradation efficiency. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 131(9). <https://doi.org/10.1007/s00339-025-08874-4>
- Agarwal, H., Venkat Kumar, S., & Rajeshkumar, S. (2017). A review on green synthesis of zinc oxide nanoparticles – An eco-friendly approach. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.03.002>
- Alfaro, V. A., Zamorano, C. V., Araya Vera, C., Mera, A. C., Zamarreño Bastias, R., & Alvarez, A. A. (2025). BiOI/Magnetic Nanocomposites Derived from Mine Tailings for Photocatalytic Degradation of Phenolic Compounds (Caffeic Acid) in Winery Wastewater. *Catalysts*, 15(10), 937. <https://doi.org/10.3390/catal15100937>
- Alharthi, F. A., Alghamdi, A. A., Al-Zaqri, N., Alanazi, H. S., Alsyahi, A. A., Marghany, A. El, & Ahmad, N. (2020). Facile one-pot green synthesis of Ag–ZnO Nanocomposites using potato peel and their Ag concentration dependent photocatalytic properties. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77426-y>
- Balogun, S. W., James, O. O., Sanusi, Y. K., & Olayinka, O. H. (2020). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using bashful (*Mimosa pudica*), leaf extract: a precursor for organic electronics applications. *SN Applied Sciences*, 2(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2127-3>
- Bognár, S., Putnik, P., & Merkulov, D. Š. (2022). Sustainable Green Nanotechnologies for Innovative Purifications of Water: Synthesis of the Nanoparticles from Renewable Sources. In *Nanomaterials* (Vol. 12, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nano12020263>

- Cherif, Y., Azzi, H., Sridharan, K., Ji, S., Choi, H., Allan, M. G., Benaissa, S., Saidi-Bendahou, K., Dampsey, L., Ribeiro, C. S., Krishnamurthy, S., Nagarajan, S., Maroto-Valer, M. M., Kuehnel, M. F., & Pitchaimutuh, S. (2023). Facile Synthesis of Gram-Scale Mesoporous Ag/TiO₂ Photocatalysts for Pharmaceutical Water Pollutant Removal and Green Hydrogen Generation. *ACS Omega*, 8(1), 1249–1261. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06657>
- Del Carmen, M., & Serrano, D. (n.d.). Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente.
- Fall, A., Ngom, I., Bakayoko, M., Sylla, N. F., Elsayed Ahmed Mohamed, H., Jadvi, K., Kaviyarasu, K., & Ngom, B. D. (2019). Biosynthesis of TiO₂nanoparticles by using natural extract of Citrus sinensis. *Materials Today: Proceedings*, 36, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.131>
- Ghamarpoor, R., Fallah, A., & Jamshidi, M. (2024). A Review of Synthesis Methods, Modifications, and Mechanisms of ZnO/TiO₂-Based Photocatalysts for Photodegradation of Contaminants. In *ACS Omega* (Vol. 9, Issue 24, pp. 25457–25492). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08717>
- Lemecho, B. A., Sabir, F. K., Andoshe, D. M., Gultom, N. S., Kuo, D. H., Chen, X., Mulugeta, E., Desissa, T. D., & Zelekew, O. A. (2022). Biogenic Synthesis of Cu-Doped ZnO Photocatalyst for the Removal of Organic Dye. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8081494>
- Maher, S., Zamina, B., Riaz, M., Riaz, S., Khalid, N., Imran, M., Fahmid, S., Ishtiaq, H., & Parveen, S. (2023). Green Synthesis of Withania coagulans Extract-Mediated Zinc Oxide Nanoparticles as Photocatalysts and Biological Agents. *ACS Omega*, 8(49), 46715–46727. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05947>
- Mancuso, A., & Iervolino, G. (2022). Synthesis and Application of Innovative and Environmentally Friendly Photocatalysts: A Review. In *Catalysts* (Vol. 12, Issue 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal12101074>
- Mutukwa, D., Taziwa, R. T., & Khotseng, L. (2024). A Review of Plant-Mediated ZnO Nanoparticles for Photodegradation and Antibacterial Applications. In *Nanomaterials* (Vol. 14, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/nano14141182>
- Narh, D., Sampson, B., Ocran Junior, S., Pokuaa Manu, G., Agyei-Tuffour, B., Nyankson, E., & Kwame Efavi, J. (2024). Green Synthesis of Citrus sinensis Peel Extract-Mediated Ag-TiO₂ and Its Application as a Photocatalyst for Organic Molecules and Antimicrobial Agent. *Journal of Nanotechnology*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/9169241>
- Ounis Dkhil, Y., Peppel, T., Sebek, M., Strunk, J., & Houas, A. (2025). Green Synthesis of Photocatalytically Active ZnO Nanoparticles Using Chia Seed Extract and Mechanistic Elucidation of the Photodegradation of Diclofenac and p-Nitrophenol. *Catalysts*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/catal15010004>
- Rodríguez Ortiz, M. de J., Hoffmann Valencia, R., Amaya Parra, G., & Luque Morales, P. A. (2021). Síntesis verde de materiales nanoestructurados de ZnO en la degradación de contaminantes orgánicos por medio de la fotocatalisis heterogénea. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 4(4), 299–313. <https://doi.org/10.37636/recit.v44299313>
- Shahzadi, S., Fatima, S., Ul Ain, Q., Shafiq, Z., & Janjua, M. R. S. A. (2025). A review on green synthesis of silver nanoparticles (SNPs) using plant extracts: A multifaceted approach in photocatalysis, environmental remediation, and biomedicine. In *RSC Advances* (Vol. 15, Issue 5, pp. 3858–3903). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d4ra07519f>
- Silva, M. C. R., Castro-Lopes, S., Jerônimo, A. G., Barbosa, R., Lins, A., Trigueiro, P., Viana, B. C., Araujo, F. P., Osajima, J. A., & Peña-Garcia, R. R. (2024). Green Synthesis of Er-Doped ZnO Nanoparticles: An Investigation on the Methylene Blue, Eosin, and Ibuprofen Removal by Photodegradation. *Molecules*, 29(2). <https://doi.org/10.3390/molecules29020391>
- Suhaimi, N. H. S., Azhar, R., Adzis, N. S., Mohd Ishak, M. A., Ramli, M. Z., Hamzah, M. Y., Ismail, K., & Nawawi, W. I. (2025). Recent updates on TiO₂-based materials for various photocatalytic applications in environmental remediation and energy production. In *Desalination and Water Treatment* (Vol. 321). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100976>
- Thiam, M., Bernardo, A. de J., Pellegrini, V. de O. A., Possatto, J. F., Dlamini, Z. W., Mahule, T. S., Ngom, B. D., Mosepele, B. Q., Thema, F. T., Mamba, B. B., Vallabhapurapu, S., Vallabhapurapu, V. S., & Polikarpov, I. (2025). Green Synthesis of ZnO Nanoparticles Using Licania tomentosa Benth (Oiti) Leaf Extract: Characterization and Applications for the Photocatalytic Degradation of Crystal Violet Dye. *Processes*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/pr13030880>
- Tiki, Y. L., Tolesa, L. D., Tiwikrama, A. H., & Chala, T. F. (2024). Ginger (Zingiber officinale)-Mediated Green Synthesis of Silver-Doped Tin Oxide Nanoparticles and Evaluation of Its Antimicrobial Activity. *ACS Omega*, 9(10), 11443–11452. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07855>
- Verma, V., Al-Dossari, M., Singh, J., Rawat, M., Kordy, M. G. M., & Shaban, M. (2022). A Review on Green Synthesis of TiO₂ NPs: Synthesis and Applications in Photocatalysis and Antimicrobial. *Polymers*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/polym14071444>
- Warner, J. C., Cannon, A. S., & Dye, K. M. (2004). Green chemistry. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(7–8), 775–799. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.006>
- Zuliani, A., & Cova, C. M. (2021). Green Synthesis

of Heterogeneous Visible-Light-Active Photocatalysts: Recent Advances. In Photochem (Vol. 1, Issue 2, pp. 147–166). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/photochem1020009>

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 29 de octubre de 2025.

Degradación fotocatalítica de diclofenaco en presencia de luz UV, H₂O₂ y TiO₂

Luna Sánchez Raúl A.^{(1)*}
 Solís Maldonado Carolina⁽¹⁾
 Ortiz Silos Nayeli⁽¹⁾
 Cristóbal Salas Alfredo⁽²⁾
 Hernández Salazar José M.⁽³⁾
 López Barragán Mariana Alejandra⁽⁴⁾

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la efectividad de los procesos UV, UV/TiO₂, UV/H₂O₂ y UV/TiO₂/H₂O₂; para degradar diclofenaco sódico (DFS) empleando dióxido de titanio comercial (AEROXIDE TiO₂-P25) y H₂O₂ al 30 % m/v. El DFS se extrajo de comprimidos de libre venta y fue caracterizado mediante espectrometría UV-vis y FT-IR. Se establecieron las condiciones de operación para cada uno de los procesos (tiempo de equilibrio de adsorción, masa óptima de catalizador y dosis óptima de H₂O₂). El seguimiento de las pruebas preliminares y de las fotodegradaciones fue realizado mediante espectrometría UV-vis y se calcularon los parámetros cinéticos correspondientes. La extracción permitió recuperar un 86 % del fármaco. Mediante análisis UV-vis se obtuvo una absorbancia máxima en 275 nm y fueron identificados los grupos funcionales de la molécula de DFS por FT-IR (C-Cl, NH, C=O, C=C, COO-). Los resultados mostraron que los procesos UV y UV/H₂O₂ alcanzaron porcentajes de degradación de 19.04 % y 34.59 %, respectivamente, en 420 min de reacción. Mientras que los procesos UV/TiO₂ y UV/H₂O₂ alcanzaron degradaciones de 95.9 % y 98.02 %, respectivamente. El estudio cinético indicó que los procesos UV/TiO₂ y UV/TiO₂/H₂O₂ muestra una cinética de pseudo-orden, mientras que el proceso UV/H₂O₂ sigue una cinética de segundo orden.

Palabras clave

diclofenaco sódico, oxidación, fotodegradación, fotocatalisis, H₂O₂

Abstract

In the present study the effectiveness of the UV, UV/TiO₂, UV/H₂O₂ and UV/TiO₂/H₂O₂ processes was evaluated, to degrade diclofenac sodium (DFS) using commercial titanium dioxide (AEROXIDE TiO₂-P25) and H₂O₂ at 30% m/v. DFS was extracted from over-the-counter pills and characterized by UV-vis and FT-IR spectrometry. The operating conditions were established for each of the processes (adsorption equilibrium time, optimal catalyst mass and optimum H₂O₂ dose). The monitoring of the preliminary tests and photodegradation experiments was carried out using UV-vis spectrometry, and the corresponding kinetic parameters were calculated. The extraction allowed for the recovery of 86% of the commercial drug. By UV-vis analysis showed a maximum absorbance at 275 nm, and FT-IR analysis identified the functional groups of the DFS molecule (C-Cl, NH, C=O, C=C, COO-). The results showed that UV and UV/H₂O₂ processes achieved degradation percentages of 19.04 % and 34.59 %, respectively, in 420 min of reaction. In contrast, the UV/TiO₂ and UV/H₂O₂

⁽¹⁾Facultad de Ciencias Químicas región Poza Rica,-Tuxpan, Universidad Veracruzana, Prolongación Av. Venustiano Carranza s/n Col. Revolución C.P. 93390, Poza Rica de Hgo., Veracruz, México. ⁽²⁾Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones región Poza Rica,-Tuxpan, Universidad Veracruzana, Prolongación Av. Venustiano Carranza s/n Col. Revolución C.P. 93390, Poza Rica de Hgo., Veracruz, México. ⁽³⁾Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Maestría en Ciencias del Ambiente, Universidad Veracruzana, Carretera Tuxpan-Tampico s/n, Col. Universitaria, C.P. 92895, Tuxpan, Veracruz, México. ⁽⁴⁾Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Manuel Nava Num. 6, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México.

processes reached degradations of 95.9 % and 98.02 %, respectively. The kinetic study indicated that the UV/TiO₂ and UV/TiO₂/H₂O₂ processes follow pseudo-order kinetics, while the UV/H₂O₂ process follows a second-order kinetics.

Keywords

diclofenac sodium, oxidation, photodegradation, photocatalysis, H₂O₂

Introducción

Actualmente, el avance tecnológico ha permitido que las técnicas analíticas puedan identificar compuestos orgánicos que previamente eran indetectables. Específicamente, los fármacos se han encontrado en aguas subterráneas y efluentes de las Plantas Tratadoras de Aguas Residuales (PTARs) (Prieto-Rodriguez et al., 2012, Estrada-Arriaga et al., 2016) debido a fuentes directas e indirectas provenientes del uso humano y veterinario, principalmente. Los tratamientos implementados en la mayoría de las PTARs son ineficientes para eliminar gran parte de los fármacos de las aguas residuales. Los efluentes finales son vertidos al ambiente conteniendo concentraciones de ng/L y µg/L de estos compuestos, convirtiendo a las PTARs en una fuente principal de contaminación (Epold et al., 2012).

Entre los diversos fármacos, se encuentra el diclofenaco sódico, un Antiinflamatorio No Esteroideo (AINE) sintético derivado del ácido fenilacético utilizado regularmente en su forma sódica, diclofenaco sódico o sodio[2-(2,6-dicloroanilino)fenil]acetato), prescrito como analgésico, antiinflamatorio y antipirético (Brogden et al., 1980). Este fármaco ha sido seleccionado debido a su alto consumo mundial, tan solo en Estados Unidos fueron realizadas más de 10 millones de prescripciones de este fármaco en el 2012 (Altman et al., 2015). Esto ocasiona que, en influentes y efluentes de las PTARs alrededor del mundo, sea frecuentemente detectado en distintas concentraciones (De la Cruz et al., 2013, Félix et al., 2013, Prieto-Rodriguez et al., 2012). Debido a su limitada biodegradación en ambientes acuáticos, ha sido necesario crear nuevas técnicas que permitan mejorar los procesos convencionales y logren eliminar el DFS así otros compuestos (Bagal & Gogate, 2014).

Recientemente, se ha reportado la remoción del DFS de aguas contaminadas por diversos métodos (Epold et al., 2012, Larous & Meniai, 2016,

Vogna et al., 2004). Un caso particular, son los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs), donde la fotocatalisis heterogénea empleando TiO₂ (UV/TiO₂) se ubica como una opción favorable para la degradación de DFS (Kanakaraju et al., 2014, Mozia et al., 2013, Prieto-Rodriguez et al., 2012). El TiO₂, es un semiconductor ampliamente aceptado, de bajo costo y no tóxico; aplicado en estudios de degradación y mineralización de compuestos orgánicos (Kanakaraju et al., 2016). Estudios demuestran resultados positivos tras implementar el proceso UV/TiO₂ en combinación con el proceso foto-Fenton (de la Cruz et al., 2013, Quiñones et al., 2015), con cavitación hidrodinámica (Bagal & Gogate, 2014), con activación electroquímica (Ihos et al., 2016) o sonicación (Klavarioti et al., 2009).

La fotooxidación con peróxido de hidrogeno (UV/H₂O₂), es otro POAs altamente efectivo para degradar contaminantes orgánicos mediante la producción de radicales •OH a partir del H₂O₂, sin embargo, no es tan empleado como la fotocatalisis heterogénea (Klavarioti et al., 2009). De hecho, en el caso de los fármacos, la cantidad de estudios reportando su implementación es limitada (Bensalah et al., 2018, Castro-Peña & Durán-Herrera, 2014, Stefan & Bolton, 1998), más escasa aún, cuando se trata específicamente del DFS (Yuan et al., 2013). Algunos autores confirman una mejora en los resultados cuando se emplea de manera combinada con otras especies como ozono, Fe²⁺ o Fe³⁺ (Klavarioti et al., 2009, Quiñones et al., 2015).

En el presente estudio se propuso emplear el proceso combinado UV/TiO₂/H₂O₂ para la degradación de diclofenaco sódico y se compararon los resultados con los obtenidos por los procesos de forma individual bajo ciertas condiciones experimentales. La importancia del estudio radica en el aporte de información acerca de la evaluación de una combinación de POAs muy poco estudiada para degradar contaminantes orgánicos y que, en el caso de diclofenaco sódico, aún no se ha reportado su implementación.

Métodos

Extracción de diclofenaco sódico

Se extrajo el DFS de comprimidos de libre venta mediante una extracción sólido-líquido. Las pastillas se trituraron hasta obtener un polvo fino. Posteriormente, el polvo se mezcló con 500 mL de acetona marca J.T. Baker® (99.60%) y se agitó durante 30 min. La mezcla se filtró al vacío usando un equipo Milipore a 450 mmHg de vacío

incorporando membranas Whatman® (2.5 µm de tamaño de poro) para separar restos sólidos del excipiente. El solvente se evaporó durante 7 días en condiciones adecuadas de ventilación, el remanente se evaporó en una estufa a 45 °C durante 4 h. El producto se volvió a triturar, se pesó y almacenó en un vial ámbar adecuadamente sellado.

Caracterización mediante técnicas analíticas

Espectrometría UV-vis

Para el análisis se empleó una solución de 5 ppm de DFS extraído y otra de DFS estándar para comparar resultados. Analizadas en un equipo Jenway 7305 con celdas de cuarzo (capacidad de 3.5 mL) en el rango de 200 a 400 nm contra un blanco de agua destilada. La curva de barrido espectral se obtuvo graficando la absorbancia contra la longitud de onda para identificar la absorbancia máxima característica del DFS.

Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR)

Para el análisis FT-IR se empleó el polvo de DFS (extraído y estándar, por separado) directamente y sin previo acondicionamiento mediante un accesorio ATR (Smart iTX) con cristal de diamante acoplado a un espectrómetro Thermo Scientific Nicolet iS10 operado a través del software OMNIC. Se analizó en el rango de 400 a 4000 cm⁻¹, con un total de 16 escaneos y una resolución de 4 cm⁻¹ (Bartolomei et al., 2006).

Sistema de reacción

El sistema de reacción, consiste en un cilindro anular de acero inoxidable de 80 cm de altura y 37 cm de diámetro con paredes de acabado espejo en las caras interiores y 4 lámparas UV Purikor de 16 W sujetas en posición vertical a las paredes y ubicadas de manera equidistante entre ellas. En la zona inferior central se colocó un recipiente de vidrio Pyrex de 500 mL de capacidad que opera como reactor tipo batch. Cuenta con un sistema de agitación, un sistema de enfriamiento con aire mediante un ventilador situado en la parte superior del reactor y un termómetro en el centro.

Pruebas preliminares y de degradación

En primer lugar, se establecieron las condiciones óptimas experimentales. Se evaluaron cargas de 0.6, 1.0, 1.4 y 1.8 g/L de AEROXIDE TiO₂-P25 de Evonik (80% anatasa, 20% rutilo); también,

dosis de 20, 340 y 680 mg/L de H₂O₂ (30 % m/v); cada prueba duró 180 minutos. Se evaluó el comportamiento de una muestra con TiO₂ sin ser activado por fuentes de luz para obtener el tiempo de equilibrio de adsorción.

En todas las pruebas de degradación, se utilizó una concentración inicial (C₀) de 20 ppm de DFS en un volumen de 250 mL en el sistema de reacción. El proceso fotoquímico (UV) se llevó a cabo en ausencia de catalizador y H₂O₂. Para el proceso UV/TiO₂ se añadió una carga de 1.4 g/L de TiO₂, con un periodo de 60 min para alcanzar el proceso de equilibrio previo al experimento. En el proceso UV/H₂O₂ se agregó una única dosis inicial de 340 mg/L de H₂O₂. En el caso del proceso UV/TiO₂/H₂O₂, se utilizó 1.4 g/L de TiO₂ con un periodo de 60 min para lograr el equilibrio, tras alcanzarlo, se añadieron 340 mg/mL de H₂O₂. En todos los casos, el proceso duró 420 min con agitación constante a 500 rpm. Las muestras de reacción, obtenidas a lo largo de cada reacción, fueron filtradas a través de membranas Milipore (0.22 µm de tamaño de poro) y analizadas en un espectrómetro Jenway 7305 a 275 nm.

Resultados y discusión

Obtención de DFS

El proceso para obtener el DFS mediante extracción sólido – líquido mostró ser eficiente tras haber recuperado 1.7301 g del ingrediente activo, representando un 86.5% de eficiencia. El DFS extraído presenta una forma pulverulenta de color ligeramente amarillo cuya solución en solventes orgánicos y agua destilada es incolora (SS, 2016). En el caso del DFS estándar, la coloración es blanca, por lo que el color presente en el DFS extraído puede atribuirse a trazas de acetona que ha quedado ligada en las partículas del DFS (Grodowska & Parczewski, 2010) o por efecto del pH (Pobudkowska & Domańska, 2014), puesto que se trabajó con el pH natural de la solución. Esta forma de extracción amplía la lista de técnicas para extraer DFS a partir de comprimidos comerciales (Hasan et al., 2017, Hsieh et al., 2017).

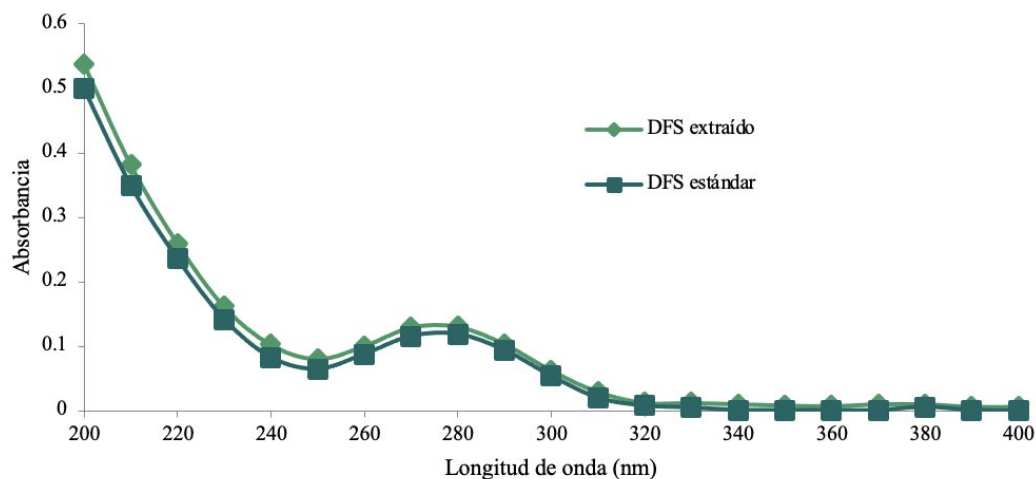
Curva de barrido espectral

Con el análisis espectral de una solución a 5 ppm de DFS extraído en el rango de 200 a 400 nm en el equipo Jenway 7305 se logró identificar claramente una señal de absorbancia máxima en 275 nm, como

se muestra en la Fugra 1, variando en 1 nm respecto a la reportada: 276 nm (Ruiz et al., 2015). En el caso del DFS estándar, se identificó en 276 nm. También se apreció un aumento en la absorbancia cerca de los 200 nm que correspondería a un pico máximo en 195 nm (Ruiz et al., 2015). La señal clara para ambos casos del DFS asegura que la matriz acuosa

no causa interferencia en el análisis espectral. Esto indica que la coloración ligeramente amarilla del producto obtenido no se debe a especies o complejos formados entre el DFS y otras especies (excipientes o solvente), de lo contrario, exhibirían absorbancias máximas a partir de los 300 nm y no en 275 nm (Adeyeye & Li, 1990, Ghiasvand et al., 2008).

Figura 1. Curva de barrido espectral de 200 a 400 nm para DFS extraído y DFS estándar ($C_0 = 5$ ppm, equipo Jenway 7305, disolvente y blanco: agua destilada).



Análisis Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR)

Mediante este análisis se asignaron ciertos grupos funcionales característicos de la estructura del DFS, de acuerdo con las bandas de absorción encontradas en el espectro IR que se muestran en la Figura 2 y resumidas en la Tabla I, mismos que han sido identificados por otros autores (Bartolomei et al., 2006, Kebebe et al., 2012).

El espectro FT-IR para el DFS estándar exhibe una señal correspondiente a la vibración de estiramiento de la amina secundaria (NH) en 3323 cm^{-1} (Bartolomei et al., 2006). En el caso del DFS extraído, la señal de los grupos NH (3323 cm^{-1}), CH de anillos aromáticos (~3050 cm^{-1}) y CH unido al carboxilato (~2967 cm^{-1}) se solapa con la señal de estiramiento del grupo OH en 3200 – 3600 (Shirse, 2012, Goh et al., 2017). La señal ancha del grupo OH, se asocia con la hidratación y presencia de solvente en el producto; por ello, en el espectro del DFS estándar no se le observa. En 1550 cm^{-1} se encuentra la señal de vibración de C=C de los anillos (Kebebe et al., 2012, Shirse, 2012). Las absorbancias en 1383 y 1572 cm^{-1} son atribuidas a las vibraciones de alargamiento de los grupo COO-

y C=O (en el carboxilato) (Aiello et al., 2014, Goh et al., 2017, Mubengayi et al., 2016). El pico en 748 cm^{-1} se debe al alargamiento C-Cl (Aiello et al., 2014, Kebebe et al., 2012). Este conjunto de señales se detectaron para ambos casos, aunque con menor intensidad para el DFS estándar. Para confirmar certeramente la presencia de acetona remanente, es preferible usar cromatografía de gases en diferentes configuraciones como lo sugieren Grodowska & Parczewski, (2010).

Efecto de la carga de catalizador

Los resultados mostraron que las cargas de 0.6 g/L y 1.0 g/L de TiO_2 alcanzaron una concentración final (C) de 13.12 ppm y 12.84 ppm lo que representa el 36.04 % y 36.53 % respectivamente, tras 180 min de irradiación. La adición de 1.8 g/L de TiO_2 incrementa el porcentaje de degradación hasta 63.65 % ($C = 6.98$ ppm) seguida por la carga de 1.4 g/L logrando degradar 59.97 % ($C = 7.82$ ppm) con una mínima diferencia entre ambas cargas. Kanakaraju et al., (2014) han observado que altas cargas de catalizador pueden retardar el proceso de degradación a causa de la interferencia y aglomeración del TiO_2 ; por consiguiente, se estableció el valor de 1.4 g/L como masa óptima de catalizador para este estudio bajo las condiciones experimentales empleadas.

Figura 2. Espectro FT-IR para una muestra de DFS extraído comparado contra DFS estándar (Equipo Thermo Scientific Nicolet iS10, método ATR, 400 – 4000 cm⁻¹).

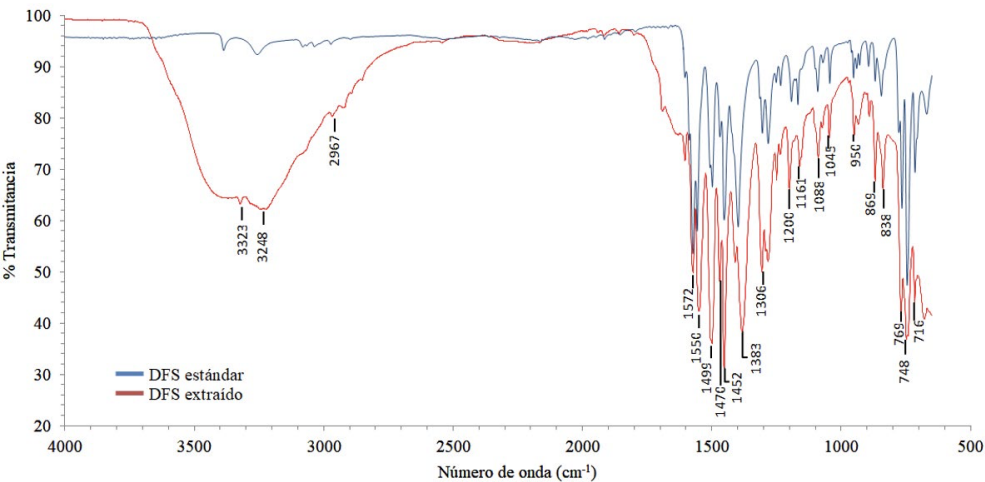


Tabla I. Asignación de grupos funcionales a bandas de absorción obtenidas mediante FT-IR para el caso del DFS extraído.

Número de onda (cm ⁻¹)	Grupo funcional asignado	Referencia
3200 – 3600	–OH	Shirse, 2012
3300 – 3500 y 1490 – 1580	–NH–	Bartolomei et al., 2006
2967	C–H	Shirse, 2012
1550	C=C en anillos bencénicos	Kebebe et al., 2010
1383 y 1572	COO ⁻ y C=O en carboxilato	Mubengayi et al., 2016
748	C–Cl	Murtaza et al., 2010

caso del DFS extraído.

Efecto de la dosis de H2O2

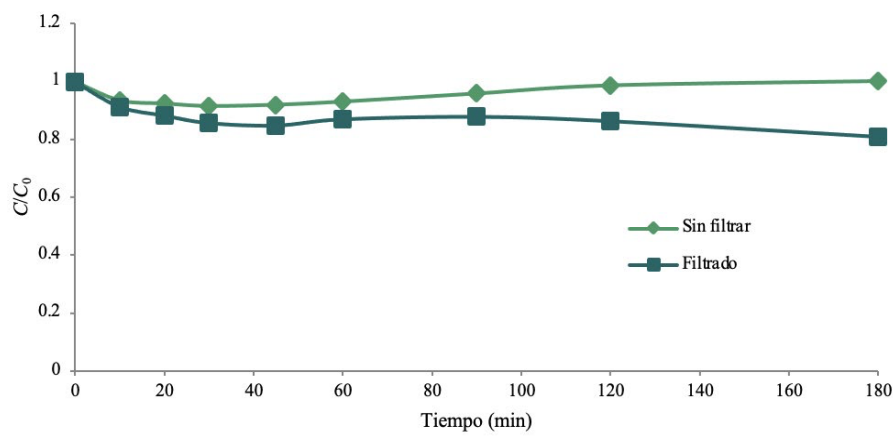
A fin de determinar la dosis de H₂O₂, fue evaluada una dosis baja, una dosis media y una dosis alta de H₂O₂. En base a los resultados, se ha observado porcentaje de degradación similares para el caso de la dosis de 20 mg/L (14.44 %) y 680 mg/L de H₂O₂ (20.31 %) llegando a concentraciones finales de 17.35 ppm y 16.24 ppm, respectivamente, con una diferencia poco significativa de 5.87 %. La dosis de 340 mg/L logró degradar 36.06 % (C = 13.03 ppm), sin embargo, presentó una mejora de tan solo 15.75 % respecto a la dosis de 680 mg/L y un 21.62 % respecto a la dosis de 20 mg/L. Esto parece indicar que el rango establecido de dosis de H₂O₂, bajo las condiciones del experimento, ha sido relativamente alto, impulsando la recombinación de radicales •OH durante la reacción por exceso de H₂O₂ (Lester et

al., 2011, Pereira et al., 2007). A pesar de lo anterior, se estableció 340 mg/L H₂O₂ como la dosis óptima para el presente estudio.

Fotosensibilidad del DFS

La irradiación directa de una solución de 20 ppm de DFS en 250 mL con lámparas UV en el sistema de reacción mostró ser poco eficiente para degradar el DFS. En la curva “filtrado” de la figura 3, se alcanzó 19.04 % de degradación (C = 17.40 ppm). En el caso de la curva “sin filtrar”, en 30 min hubo una degradación de 8.44 %, sin embargo, la concentración aumentó hasta 21.54 ppm después de 180 min de reacción. Este aumento ocurre por la precipitación del DFS al modificarse el pH causado por ácidos tras la deshidrocloración del DFS, tal como lo explican Epold et al., (2012) y Kanakaraju et al., (2014).

Figura 3. Efecto de la irradiación UV sobre una solución de DFS ($C_0 = 20$ ppm, $T_{prom} = 31.2$ °C).



La solución, inicialmente incolora, se tornó ligeramente amarilla. Zhang et al., (2011) atribuyen este cambio a la presencia de O_2 disuelto. Mediante espectrometría UV-vis en el rango de 200 a 400 nm se identificaron señales claras en 242 y 282 nm que corresponden a la presencia de la molécula N-2,6-diclorofenil amina, un subproducto del DFS identificado anteriormente por Ruiz et al., (2015).

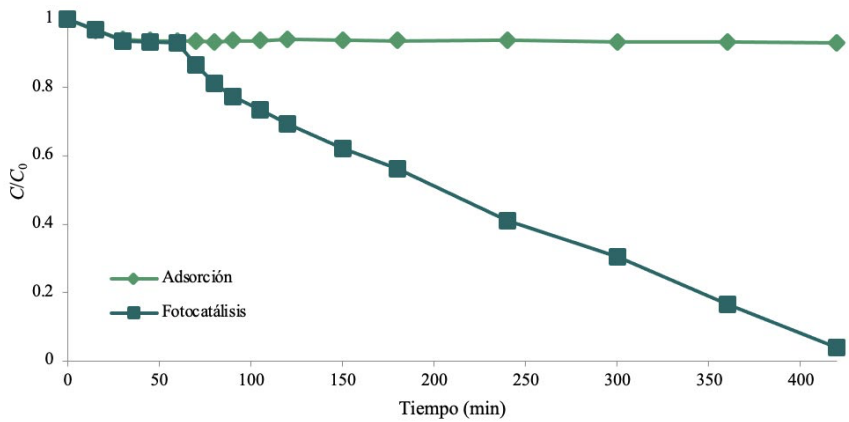
Degradación de DFS mediante procesos de Oxidación Avanzada

Proceso UV/TiO₂

Con el fin de determinar el efecto de adsorción del TiO_2 sin ser activado en suspensión se realizó una prueba en condiciones de oscuridad. Se encontró que existe una ligera disminución del 6.98 % de la concentración en 60 min, manteniéndose constante durante 360 min. Periodos similares han sido reportados por Rizzo et al., (2009) y Calza et al., (2006).

En el proceso UV/ TiO_2 , la solución con 1.4 g/L de TiO_2 mostró un porcentaje de degradación del 95.90 % ($C = 0.84$) después de 420 min, incluyendo el periodo de equilibrio, como se observa en la Figura 4. Tal como lo demuestran los resultados de este estudio, el porcentaje de degradación se incrementa empleando una carga óptima de TiO_2 y un extenso tiempo de irradiación UV, aunque en la literatura se pueden encontrar tiempos de reacción más cortos. Kanakaraju et al., (2014) reportan la degradación completa de diclofenaco ácido (30 ppm de DFC, 0.1 g/L TiO_2) tras 15 min bajo irradiación UV con lámparas MP en un reactor batch con recirculación. Por su parte, Epold et al., (2012), alcanzaron una degradación de 55 % de una solución de DFS ($C_0 = 20$ ppm, 0.2 g/L TiO_2) empleando lámparas UV de 250 W. Se podría modificar la geometría del reactor o el pH de la solución como lo sugieren Prieto-Rodríguez et al., (2012) y Kanakaraju et al., (2014), a fin de optimizar el proceso.

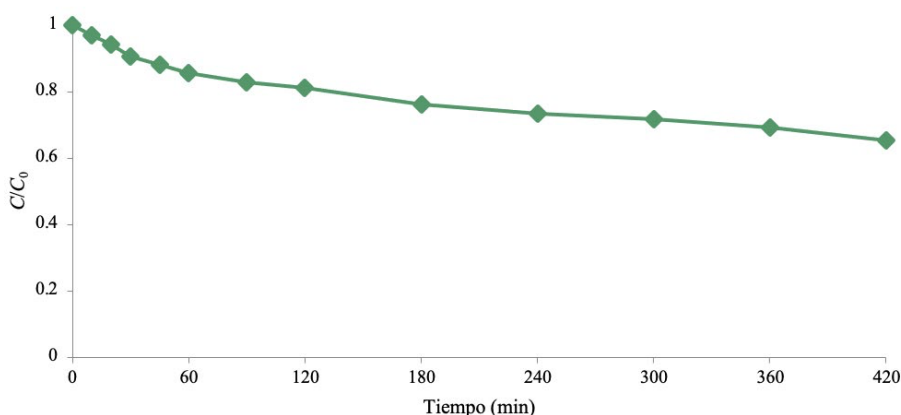
Figura 4. Comparación entre el proceso de adsorción ($C_0 = 20$ ppm, 1.4 g/L TiO_2 , $T_{prom} = 30.1$ °C) y el proceso fotocatalítico ($C_0 = 20$ ppm, 1.4 g/L TiO_2 , $T_{prom} = 32.3$ °C).



En este proceso se empleó el H₂O₂ como fuente principal de •OH al irradiarse con luz UV. La figura 5 muestra el perfil de degradación de DFS (C₀ = 20 ppm, V = 250 mL) mediante el proceso UV/H₂O₂ con una dosis inicial de 340 mg/L H₂O₂ durante 420 min sin periodo de equilibrio. El perfil disminuye gradualmente alcanzando a degradar 34.57 % (C =

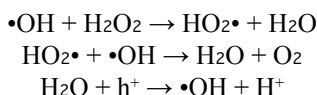
13.54 ppm). La baja eficiencia de la reacción pudo verse afectada por la recombinación de radicales •OH causada por una alta concentración de ellos (Kim et al., 2013). Lester et al., (2011) observó en su estudio (C₀ = 1 ppm ciprofloxacino, V = 100 mL,) que C_{H₂O₂} > 150 mg/L perjudican la velocidad de reacción. Por lo que se propone investigar otro rango de concentraciones bajo las mismas condiciones experimentales de este estudio.

Figura 5. Perfil de degradación de DFS respecto al tiempo durante el proceso UV/H₂O₂ (C₀ = 20 ppm, 340 mg/L H₂O₂, T_{prom} = 31.3 °C).



Proceso UV/TiO₂/H₂O₂

En la figura 6, se muestra el perfil de la degradación fotocatalítica de una solución de 20 ppm DFS con 1.4 g/L TiO₂ y 340 mg/L H₂O₂. En los primeros 60 min, ocurre el equilibrio de adsorción. El proceso alcanza una degradación de 98.02 % (C = 0.42 ppm). Se esperaría que la sinergia del proceso UV/TiO₂/H₂O₂ permitiera reducir el tiempo de reacción, no obstante, se observa un comportamiento muy similar al proceso UV/TiO₂, esto sugiere que la dosis de H₂O₂ ha tenido un efecto poco significativo en el proceso. El exceso de radicales •OH producido por la dosis alta de H₂O₂ condujo a la inhibición de la sinergia del proceso UV/TiO₂/H₂O₂ a través de un mecanismo de producción/recombinación de estos radicales según las ecuaciones propuestas por Domènech et al., (2001) y Saquib et al., (2008):



Bajo este esquema, la adición de H₂O₂ no contribuye de manera significativa en la degradación del DFS; el proceso UV/TiO₂ gobierna la reacción en todo momento. Hasta el momento en que se realiza este estudio, no se tiene noción de literatura que reporte

la degradación del DFS mediante el proceso UV/TiO₂/H₂O₂ aunque se puede encontrar estudios con otros compuestos orgánicos modelo (Saquib et al., 2008). Tampoco se ha reportado la interacción DFS-TiO₂-H₂O₂ en un medio acuoso, limitando la capacidad de comparar los resultados observados en el proceso combinado de este estudio.

Cinética química

Para los procesos UV/TiO₂ y UV/TiO₂/H₂O₂, se obtuvo una cinética de orden fraccional (o pseudo-orden) cercano a un modelo cinético de orden cero, cuyas ecuaciones de velocidad se presentan en la ecuación 1 y 2, respectivamente:

(1)

$$-r = (0.000224645 \text{ mM}^{0.843} \text{ min}^{-1}) C^{0.157}$$

(2)

$$-r = (0.00017167 \text{ mM}^{0.9312} \text{ min}^{-1}) C^{0.0688}$$

El cinética de pseudo-orden encontrada en este estudio para los dos POAs ha sido reportado numerosas veces en la literatura (Kanakaraju et al., 2015, Quiñones et al., 2015). En el caso del

proceso UV/H₂O₂, los datos experimentales fueron evaluados mediante la ecuación integrada de segundo orden graficando 1/C contra el tiempo. Los datos se ajustan a una línea recta con un coeficiente R² cercano a la unidad, confirmando que la reacción del proceso UV/H₂O₂ sigue un modelo cinético de segundo orden. La ecuación cinética para este proceso se representa en la ecuación 3:

(3)

$$-r = (0.0176 \text{ mM}^{-1} \text{ min}^{-1} \text{ C}^2$$

Según diversos autores, los procesos UV/POA siguen una cinética de pseudo-primer orden (Bensalah et al., 2018), aunque se han reportado excepciones (Bagal & Gogate, 2014). La cinética de segundo orden para el caso del proceso UV/H₂O₂

Figura 6. Perfil de degradación de DFS respecto al tiempo durante el proceso combinado UV/TiO₂/H₂O₂ (C₀ = 20 ppm, 1.4 g/L TiO₂, 340 mg/L H₂O₂, T_{prom} = 33.1 °C).

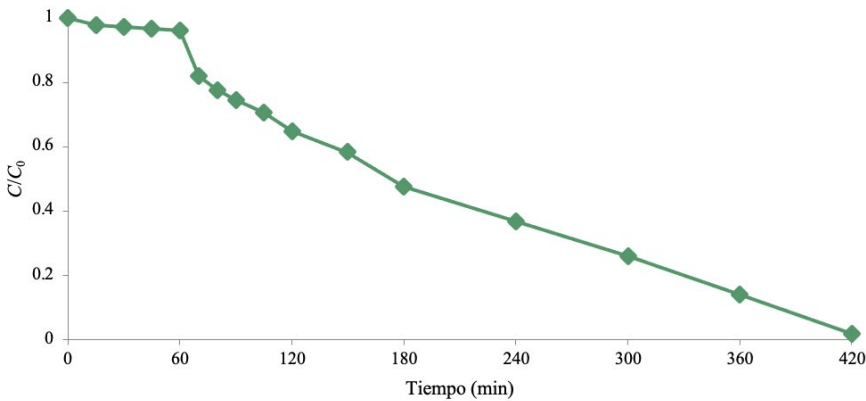


Tabla II. Datos cinéticos de la degradación fotocatalítica de DFS mediante diversos POAs.

POA	Orden de reacción (n)	Constante de reacción (k)	Unidades para k	R²	Velocidad de reacción (-r) (mM min⁻¹)
UV/TiO₂	0.157	0.000224645	mM ^{0.843} min⁻¹	0.9993	0.000123957
UV/TiO₂/H₂O₂	0.0688	0.00017167	mM ^{0.9312} min⁻¹	0.9842	0.000133693
UV/H₂O₂	2	0.0176	mM⁻¹ min⁻¹	0.9571	0.000049980

también ha sido observada por kim et al., (2013). Los datos cinéticos de los procesos UV/POA se muestran en la Tabla II:

Conclusiones

La extracción sólido-líquido mostró ser un método sencillo y eficiente para obtener diclofenaco sódico de pastillas comerciales. Los resultados de la caracterización mediante espectrometría UV-vis y FT-IR constataron la presencia de DFS; el espectro FT-IR sugiere la presencia de trazas de acetona en el producto de extracción obtenido. Mediante pruebas preliminares se establecieron los

valores óptimos de masa de TiO₂ y dosis de H₂O₂ bajo las condiciones experimentales empleadas en este estudio. Los resultados del proceso UV han demostrado que la fotólisis directa es incapaz de promover la degradación completa de DFS. La baja eficiencia del proceso UV/H₂O₂ sugiere que se llevó a cabo la recombinación de radicales •OH durante la degradación del fármaco. Los mayores porcentajes de degradación observados fueron para los procesos UV/TiO₂ y UV/TiO₂/H₂O₂, aunque este último, en comparación con el proceso UV/TiO₂, mostró similitud tanto en el perfil de degradación como en el tiempo de reacción, debido a la inhibición de la reacción a causa de la probable recombinación de radicales oxidantes. Los datos cinéticos indican que

la ecuación de velocidad para los POAs evaluados pueden ajustarse a un modelo cinético de pseudo-orden y, en el caso UV/H₂O₂, a un modelo de segundo orden.

Agradecimientos

Se agradece al estudiante de la licenciatura en ingeniería química: Julio Cesar Hernández Mateos que apoyo en el desarrollo experimental de este proyecto.

Declaración de conflicto de interés

N/A

Referencias

- Adeyeye, C. M., & Li, P.-K. (1990). Diclofenac Sodium. En *Analytical Profiles of Drug Substances* (pp. 123–144). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0099-5428\(08\)60366-4](https://doi.org/10.1016/S0099-5428(08)60366-4)
- Aielo, P. B., Borges, F. A., Romeira, K. M., Miranda, M. C. R., De Arruda, L. B., Filho, P. N. L., De C Drago, B., & Herculano, R. D. (2014). Evaluation of sodium diclofenac release using natural rubber latex as carrier. *Materials Research*, 17(suppl 1), 146–152. <https://doi.org/10.1590/s1516-14392014005000010>
- Altman, R., Bosch, B., Brune, K., Patrignani, P., & Young, C. (2015). Advances in NSAID development: evolution of diclofenac products using pharmaceutical technology. *Drugs*, 75(8), 859–877. <https://doi.org/10.1007/s40265-015-0392-z>
- Bagal, M. V., & Gogate, P. R. (2014). Degradation of diclofenac sodium using combined processes based on hydrodynamic cavitation and heterogeneous photocatalysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(3), 1035–1043. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.10.020>
- Bartolomei, M., Bertocchi, P., Antoniella, E., & Rodomonte, A. (2006). Physico-chemical characterisation and intrinsic dissolution studies of a new hydrate form of diclofenac sodium: comparison with anhydrous form. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 40(5), 1105–1113. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2005.09.009>
- Bensalah, N., Chair, K., & Bedoui, A. (2018). Efficient degradation of tannic acid in water by UV/H₂O₂ process. *Sustainable Environment Research*, 28(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.04.004>
- Brogden, R. N., Heel, R. C., Pakes, G. E., Speight, T. M., & Avery, G. S. (1980). Diclofenac sodium: A review of its pharmacological properties and therapeutic use in rheumatic diseases and pain of varying origin. *Drugs*, 20(1), 24–48. <https://doi.org/10.2165/00003495-198020010-00002>
- Calza, P., Sakkas, V. A., Medana, C., Baiocchi, C., Dimou, A., Pelizzetti, E., & Albanis, T. (2006). Photocatalytic degradation study of diclofenac over aqueous TiO₂ suspensions. *Applied Catalysis. B, Environmental*, 67(3–4), 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.04.021>
- Castro-Peña, L., & Durán-Herrera, J. E. (2014). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Tecnología en Marcha*, 27(2), 40. <https://doi.org/10.18845/tm.v27i2.1807>
- De la Cruz, N., Esquius, L., Grandjean, D., Magnet, A., Tungler, A., de Alencastro, L. F., & Pulgarín, C. (2013). Degradation of emergent contaminants by UV, UV/H₂O₂ and neutral photo-Fenton at pilot scale in a domestic wastewater treatment plant. *Water Research*, 47(15), 5836–5845. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.005>
- Domènech, X., Jardim, W. F. y Litter, M. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En: *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*. (M. A. Blesa, Ed.). CYTED, La Plata, Argentina, pp. 4–26.
- Epold, I., Dulova, N., & Trapido, M. (2012). Degradation of diclofenac in aqueous solution by homogeneous and heterogeneous photolysis. *Journal of environmental engineering & ecological science*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.7243/2050-1323-1-3>
- Estrada-Arriaga, E. B., Cortés-Muñoz, J. E., González-Herrera, A., Calderón-Mólgora, C. G., de Lourdes Rivera-Huerta, M., Ramírez-Camperos, E., Montellano-Palacios, L., Gelover-Santiago, S. L., Pérez-Castrejón, S., Cardoso-Vigueros, L., Martín-Domínguez, A., & García-Sánchez, L. (2016). Assessment of full-scale biological nutrient removal systems upgraded with physico-chemical processes for the removal of emerging pollutants present in wastewaters from Mexico. *The Science of the Total Environment*, 571, 1172–1182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.118>
- Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C., & Jiménez-Cisneros, B. (2013). The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *The Science of the Total Environment*, 454–455, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.088>
- Ghiasvand, A. R., Taherimaslak, Z., Badiie, M. Z. & Farajzadeh, M. A. (2008). A new homogeneous liquid-liquid extractive-spectrophotometric method for determination of diclofenac in urine. *Oriental Journal of Chemistry*, 24 (1), 83–90. <http://www.orientjchem.org/?p=11258>
- Goh, C. F., Craig, D. Q. M., Hadgraft, J., & Lane, M. E. (2017). The application of ATR-FTIR spectroscopy and multivariate data analysis to study drug crystallisation in the stratum corneum. *European Journal of Pharmaceutics*

- and Biopharmaceutics, 111, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.10.025>
- Grodowska, K. & Parczewski, A. (2010). Organic solvents in the pharmaceutical industry. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 67(1), 3–12. <http://polona.pl/item/29731608>
- Hasan, M. K., Hossain, M. A., Sultana, A., Shoeb, M., & Nahar, N. (2017). Evaluation of diclofenac by UV-Vis spectrophotometer in some locally produced tablets. *Dhaka University Journal of Science*, 65(2), 163–165. <https://doi.org/10.3329/dujs.v65i2.54525>
- Hsieh, D. S., Lindrud, M., Lu, X., Zordan, C., Tang, L., & Davies, M. (2017). A process for active pharmaceutical ingredient recovery from tablets using green engineering technology. *Organic Process Research & Development*, 21(9), 1272–1285. <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.7b00146>
- Ihos, M., Lazau, C., Manea, F., Andres, L. & Pode, R. (2016). Diclofenac degradation by photocatalytically-assisted electrochemical method. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 17 (1), 307-314.
- Kanarakaju, D., Motti, C. A., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2014). Photolysis and TiO₂-catalysed degradation of diclofenac in surface and drinking water using circulating batch photoreactors. *Environmental Chemistry*, 11(1), 51. <https://doi.org/10.1071/en13098>
- Kanarakaju, D., Motti, C. A., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2015). TiO₂ photocatalysis of naproxen: effect of the water matrix, anions and diclofenac on degradation rates. *Chemosphere*, 139, 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.070>
- Kanarakaju, D., Motti, C. A., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2016). Solar photolysis versus TiO₂-mediated solar photocatalysis: a kinetic study of the degradation of naproxen and diclofenac in various water matrices. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(17), 17437–17448. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6906-8>
- Kebebe, D., Belete, A., & Gebre-Mariam, T. (2012). Evaluation of two olibanum resins as rate controlling matrix forming excipients in oral sustained release tablets. *Ethiopian pharmaceutical journal*, 28(2). <https://doi.org/10.4314/epj.v28i2.4>
- Kim, I., Kim, M., Yoon, Y., Im, J., & Zoh, K. (2013). Kinetics and degradation mechanism of clofibric acid and diclofenac in UV photolysis and UV/H₂O reaction. *Desalination And Water Treatment*, 52(31-33), 6211–6218. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.817507>
- Klavarioti, M., Mantzavinos, D., & Kassinos, D. (2009). Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment International*, 35(2), 402–417. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.009>
- Larous, S., & Meniai, A.-H. (2016). Adsorption of Diclofenac from aqueous solution using activated carbon prepared from olive stones. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(24), 10380–10390. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.096>
- Lester, Y., Avisar, D., Gozlan, I., & Mamane, H. (2011). Removal of pharmaceuticals using combination of UV/H₂O₂/O₃ advanced oxidation process. *Water Science and Technology*, 64(11), 2230–2238. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.079>
- Mozia, S., Darowna, D., Przepiórski, J., & Morawski, A. W. (2013). Evaluation of performance of hybrid photolysis-DCMD and photocatalysis-DCMD systems utilizing UV-C radiation for removal of diclofenac sodium salt from water. *Polish Journal of Chemical Technology*, 15(1), 51–60. <https://doi.org/10.2478/pjct-2013-0010>
- Mubengayi, C. K., & Ramli, Y. (2016). Quality evaluation of diclofenac formulations manufactured in DR Congo. *Pharmaceutical Analytical Chemistry Open Access*, 02(01). <https://doi.org/10.4172/2471-2698.1000112>
- Murtaza, G., Ahmad, M., & Shahnaz, G. (2010). Microencapsulation of Diclofenac Sodium by Nonsolvent Addition Technique. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research: TJPR*, 9(2). <https://doi.org/10.4314/tjpr.v9i2.53709>
- Pereira, V. J., Linden, K. G., & Weinberg, H. S. (2007). Evaluation of UV irradiation for photolytic and oxidative degradation of pharmaceutical compounds in water. *Water Research*, 41(19), 4413–4423. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.056>
- Pobudkowska, A., & Domańska, U. (2014). Study of pH-dependent drugs solubility in water. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 20(1), 115–126. <https://doi.org/10.2298/ciceq120531116p>
- Prieto-Rodriguez, L., Miralles-Cuevas, S., Oller, I., Agüera, A., Li Puma, G., & Malato, S. (2012). Treatment of emerging contaminants in wastewater treatment plants (WWTP) effluents by solar photocatalysis using low TiO₂ concentrations. *Journal of Hazardous Materials*, 211–212, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.008>
- Quiñones, D. H., Álvarez, P. M., Rey, A., & Beltrán, F. J. (2015). Removal of emerging contaminants from municipal WWTP secondary effluents by solar photocatalytic ozonation. A pilot-scale study. *Separation and Purification Technology*, 149, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.033>
- Rizzo, L., Meric, S., Kassinos, D., Guida, M., Russo, F., & Belgiorno, V. (2009). Degradation of diclofenac by TiO₂ photocatalysis: UV absorbance kinetics and process evaluation through a set of toxicity bioassays. *Water Research*, 43(4), 979–988. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.040>
- Ruiz, J., Delfino, M. R., Monzón, C. M., Jorge, N. L. y Sarno, M. (2015). Diclofenac sodium UV degradation. *Asian Journal of Science and Technology*, 6 (7), 1561-1565. <http://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/28018>
- Saqib, M., Abu Tariq, M., Haque, M. M., & Muneer, M.

- (2008). Photocatalytic degradation of disperse blue 1 using UV/TiO₂/H₂O₂ process. *Journal of Environmental Management*, 88(2), 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.012>
- Shirse, P. (2012). Formulation and Evaluation of Bilayer Tablets of Diclofenac Sodium with Ranitidine HCL for Sustained and Immediate Release. *Journal Of Applied Pharmaceutical Science*. <https://doi.org/10.7324/japs.2012.2523>
- SS. (2016). *Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos*. Secretaría de Salud. Documento regulatorio. Ciudad de México, México. 973 pp.
- Stefan, M. I., & Bolton, J. R. (1998). Mechanism of the degradation of 1,4-dioxane in dilute aqueous solution using the UV/hydrogen peroxide process. *Environmental Science & Technology*, 32(11), 1588–1595. <https://doi.org/10.1021/es970633m>
- Vogna, D., Marotta, R., Napolitano, A., Andreozzi, R., & d'Ischia, M. (2004). Advanced oxidation of the pharmaceutical drug diclofenac with UV/H₂O₂ and ozone. *Water Research*, 38(2), 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.09.028>
- Yuan, H., Zhou, X., & Zhang, Y.-L. (2013). Degradation of acid pharmaceuticals in the UV/H₂O₂ process: Effects of humic acid and inorganic salts. *Clean: Soil, Air, Water*, 41(1), 43–50. <https://doi.org/10.1002/clen.201200107>
- Zhang, N., Liu, G., Liu, H., Wang, Y., He, Z., & Wang, G. (2011). Diclofenac photodegradation under simulated sunlight: Effect of different forms of nitrogen and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 192(1), 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.038>

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 30 de octubre de 2025.

Síntesis verde del ZnO en aplicaciones fotocatalíticas

Montalvo Romero Carlos^{(1)*}

Oros Ruíz Socorro⁽²⁾

Zermeño Reséndiz Brenda⁽³⁾

Jacobo Azura Aracely⁽⁴⁾

Ginés Palestino Ruby⁽⁵⁾

RESUMEN

La síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) ha captado considerable atención debido a su eficacia y sostenibilidad, al utilizar extractos de plantas en su producción. Antes de 2020, múltiples estudios revelaron aplicaciones de estas nanopartículas en áreas como la medicina, la fotocatalisis y la remediación de aguas residuales.

Investigaciones recientes han logrado sintetizar ZnO:Mg a partir de extracto de *T. diversifolia*, obteniendo nanopartículas con un tamaño promedio de 20,13 nm. Asimismo, el uso de *R. coriaria* ha dado lugar a nanopartículas de un distintivo color verde, con un tamaño de 16,69 nm. Por otro lado, el extracto de *Moringa oleifera* ha mostrado un notable rendimiento fotocatalítico en la degradación de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales. La optimización de estos métodos de síntesis ecológica y la mejora de la biocompatibilidad son aspectos cruciales para avanzar hacia aplicaciones prácticas en salud y tecnologías sostenibles.

Se han documentado diversos artículos que abordan la síntesis de nanopartículas de óxido de zinc utilizando métodos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Este enfoque resulta fundamental en un contexto donde la contaminación ambiental ya está teniendo un efecto considerable en el futuro del planeta. Al analizar este material, podemos obtener una comprensión más profunda de

las iniciativas actuales que buscan minimizar el uso de sustancias químicas nocivas, las cuales podrían perjudicar nuestro entorno a largo plazo.

Palabras clave

Óxido de zinc, síntesis, fotodegradación, síntesis verde, catalizadores.

Abstract

The green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles has garnered considerable attention due to its efficacy and sustainability, utilizing plant extracts in their production. Before 2020, multiple studies revealed applications for these nanoparticles in areas such as medicine, photocatalysis, and wastewater remediation.

Recent research has successfully synthesized ZnO:Mg from *T. diversifolia* extract, obtaining nanoparticles with an average size of 20.13 nm. Similarly, the use of *R. coriaria* has resulted in nanoparticles with a distinctive green color, measuring 16.69 nm. Furthermore, *Moringa oleifera* extract has demonstrated remarkable photocatalytic performance in the degradation of organic compounds present in wastewater. Optimizing these green synthesis methods and improving biocompatibility are crucial for

⁽¹⁾ Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56 no. 4 colonia Benito Juárez C.P. 24180, Cd. del Carmen, Campeche, México.

⁽²⁾ Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Dr. Manuel Nava 6, Zona Universitaria, C.P. 78280, S.L.P., México. ⁽³⁾ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Dr. Manuel Nava 6, Zona Universitaria, C.P. 78280, México. ⁽⁴⁾ División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria alta S/N, Colonia Noria Alta, C.P. 36050, Guanajuato, Gto, México. ⁽⁵⁾ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prolongación Oriente 6, No. 1009, Colonia Rafael Alvarado, C.P. 94340 Orizaba, Ver., México.

advancing practical applications in healthcare and sustainable technologies.

Several articles have been published addressing the synthesis of zinc oxide nanoparticles using more sustainable and environmentally friendly methods. This approach is crucial in a context where environmental pollution is already having a significant impact on the future of the planet. By analyzing this material, we can gain a deeper understanding of current initiatives seeking to minimize the use of harmful chemicals, which could harm our environment in the long term.

Keywords

Zinc oxide, synthesis, photo degradation, green synthesis, catalysts

1. Introducción

La química verde es un enfoque innovador que busca hacer la química más sostenible y menos perjudicial para el medio ambiente. Este concepto se basa en la idea de que los productos químicos y los procesos que los producen deben ser diseñados de manera que reduzcan o eliminen el uso y la generación de sustancias peligrosas. La química verde no solo se centra en la reducción de residuos, sino que también promueve la eficiencia energética y el uso de materias primas renovables.

La química verde se define como el diseño de productos y procesos químicos que minimizan el uso y la generación de sustancias peligrosas. Este enfoque se centra en la sostenibilidad, buscando crear productos que sean seguros tanto para los seres humanos como para el medio ambiente. En lugar de simplemente tratar los desechos o contaminantes una vez que han sido producidos, la química verde se esfuerza por prevenir su formación desde el principio. Esto implica un cambio en la forma en que se lleva a cabo la investigación y el desarrollo en el campo de la química.

El concepto de química verde ha ganado popularidad en las últimas décadas, especialmente a medida que la conciencia sobre los problemas ambientales ha crecido. Los científicos y profesionales de la química han comenzado a adoptar prácticas más sostenibles en sus laboratorios y procesos industriales. Esto no solo es beneficioso para el medio ambiente, sino que también puede resultar en ahorros de costos y mejoras en la eficiencia operativa. Al incorporar principios de química verde, las empresas pueden

innovar y adaptarse a un mercado que valora cada vez más la sostenibilidad. Presentemos ahora los 12 Principios de la Química Verde (Doria, 2009):

1. Prevención de residuos: es mejor prevenir los residuos que tratarlos o limpiarlos una vez creados.

2. Economía atómica: Los métodos sintéticos deben diseñarse para maximizar la incorporación de todos los materiales utilizados en el proceso en el producto final.

3. Síntesis químicas menos peligrosas – Siempre que sea posible, los métodos sintéticos deben diseñarse para utilizar y generar sustancias que posean poca o ninguna toxicidad para la salud humana y el medio ambiente.

4. Diseño de productos químicos más seguros: los productos químicos deben diseñarse para preservar la eficacia de su función y reducir la toxicidad.

5. Disolventes y auxiliares más seguros: el uso de sustancias auxiliares (por ejemplo, disolventes, agentes de separación, etc.) debe hacerse innecesario siempre que sea posible y, cuando se utilicen, deben ser inocuos.

6. Diseño para la Eficiencia Energética: Se deben reconocer los impactos ambientales y económicos de los requerimientos energéticos y minimizarlos. Los métodos sintéticos deben realizarse a temperatura y presión ambiente.

7. Uso de materias primas renovables: una materia prima o materia prima debe ser renovable en lugar de agotarse siempre que sea técnica y económicamente factible.

8. Reducir los derivados: la derivatización innecesaria (uso de grupos bloqueantes, protección/desprotección, modificación temporal de procesos físicos/químicos) debe minimizarse o evitarse si es posible, porque dichos pasos requieren reactivos adicionales y pueden generar desechos.

9. Catálisis – Los reactivos catalíticos (lo más selectivos posible) son superiores a los reactivos estequiométricos.

10. Diseño para la degradación – Los productos químicos deben diseñarse

de manera que al final de su función se descompongan en productos de degradación inocuos y no persistan en el medio ambiente.

11. Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación: es necesario desarrollar más metodologías analíticas para permitir el seguimiento y control del proceso en tiempo real antes de la formación de sustancias peligrosas.

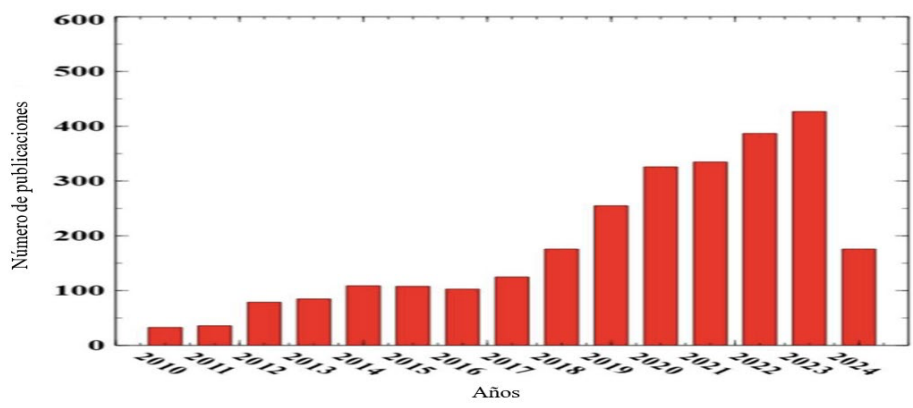
12. Química inherentemente más segura para la prevención de accidentes: las sustancias y la forma de las sustancias utilizadas en un proceso químico deben elegirse para minimizar el potencial de accidentes químicos, incluidos liberaciones, explosiones e incendios.

La química verde se fundamenta en principios que buscan minimizar el impacto ambiental de la actividad química, pero su significado ha evolucionado con el tiempo. A medida que surgen nuevas tecnologías, se priorizan las fuentes renovables y el ahorro energético, en respuesta a los desafíos que plantea

el cambio climático y otras crisis ambientales. La industria debe integrar objetivos sostenibles en sus estrategias comerciales para mitigar estos efectos negativos. La química verde no solo mejora la salud pública al reducir residuos y sustancias tóxicas, sino que también impulsa la economía mediante procesos más eficientes, lo que puede resultar en la creación de empleos en sectores sostenibles. Asimismo, esta transición puede atraer inversiones e incentivar la innovación. La investigación y el desarrollo son esenciales para avanzar en este campo, y la inversión en tecnologías limpias, junto con la educación sobre prácticas sostenibles, será crucial para una efectiva integración de la química verde en la industria. En la figura 1 se resumen las publicaciones de los últimos años donde se abarcan la química verde., y se ve como se han ido incrementando las publicaciones de desde el 2021 al 2024 (Mousa et. al., 2024)

El ZnO es un material prometedor por ser de gran interés para un amplio número de aplicaciones, una de ellas es la fotocatálisis, debido a su bajo costo, fácil producción, excelente estabilidad electroquímica y alta movilidad de electrones, por lo tanto, está recibiendo mucha atención en tiempos recientes.

Figura 1. Comparación de las publicaciones utilizando la síntesis verde para el ZnO por año de publicación del 2010 al 2024 (Mousa et. al., 2024).



Se ha demostrado que el uso de nanopartículas sintetizadas ecológicamente se prefiere actualmente en comparación a los nanomateriales sintetizados de forma tradicional, debido al uso de una mayor cantidad de productos químicos para la producción de los mismos que pueden llegar a ser dañinos y tóxicos para la salud humana y el medio ambiente, sin mencionar que la producción de nanopartículas con excelentes propiedades ópticas y morfológicas sintetizadas de forma tradicional son particularmente costosas (Zu y Wang, 2025; Mahajan et al., 2025). Los procesos de obtención de materiales a través de la síntesis verde, en su mayoría se han orientado

en la obtención de óxidos metálicos basado a partir de metales como el Oro, Plata, Magnesio, Titanio, Aluminio y Zinc. Debido a sus amplias aplicaciones e inocuidad, el ZnO es el material de mayor interés a nivel mundial por diversos grupos de investigación los cuales lo han obtenido por diferentes técnicas físicas y químicas (Pal, et al., (2024; Ounis et al., 2025).

Asimismo, en el presente trabajo se plantea la revisión de la literatura de la obtención de nano partículas de ZnO a través de una síntesis verde asistido por percursoros de productos naturales,

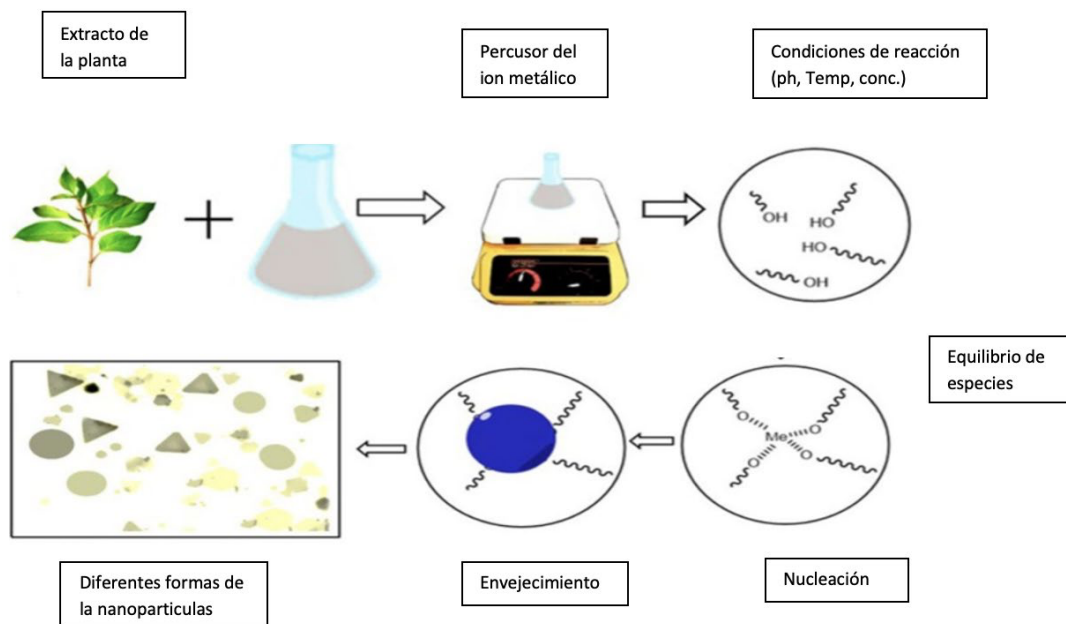
controlando la morfología, tamaño, estructura y las propiedades ópticas del material.

2. Procesos de síntesis verde

La síntesis verde, también conocida como química verde, es un enfoque innovador para la creación de materiales y compuestos que prioriza la sostenibilidad y la protección ambiental. A diferencia

de los métodos de síntesis química tradicionales que a menudo utilizan solventes tóxicos, reactivos peligrosos y generan grandes cantidades de desechos, la síntesis verde se centra en reducir o eliminar el uso y la producción de sustancias nocivas (Figura 2). Este campo se inspira en la naturaleza para desarrollar procesos más eficientes y ecológicos, utilizando recursos renovables como plantas y microorganismos.

Figura 2. Proceso de la síntesis verde



2.1 Principios fundamentales

Los principios de la química verde guían el diseño de productos y procesos químicos más seguros. Entre los principios clave se encuentran la prevención de residuos, promoviendo su eliminación antes que su tratamiento, y la economía atómica, que busca maximizar la incorporación de materiales de partida en el producto final. También es fundamental el diseño de productos químicos menos tóxicos y el uso de solventes y auxiliares más seguros, evitando sustancias peligrosas y optando por opciones inocuas cuando sea necesario. Estos principios son esenciales para avanzar hacia una síntesis más sustentable y segura.

2.2 Aplicaciones y beneficios

La síntesis verde tiene un impacto significativo en diversas industrias, desde la farmacéutica y la cosmética hasta la nanotecnología y la producción de biocombustibles. Por ejemplo, se utiliza para crear nanopartículas con fines médicos o para la

purificación de agua, usando extractos de plantas en lugar de químicos agresivos. Sus beneficios son múltiples:

- **Reducción de la contaminación:** Al evitar el uso de sustancias peligrosas, se minimiza la liberación de contaminantes en el aire, el agua y el suelo.
- **Ahorro de recursos:** El uso de materias primas renovables y procesos más eficientes reduce el consumo de energía y recursos naturales.
- **Mejora de la seguridad:** Los procesos más seguros protegen tanto a los trabajadores como a los consumidores.
- **Competitividad económica:** La reducción de residuos y el menor consumo de energía pueden llevar a una mayor eficiencia económica a largo plazo.

En un mundo cada vez más consciente del medio ambiente, la síntesis verde se presenta no solo como una alternativa viable, sino como una necesidad urgente para el futuro de la química y la industria.

3.Utilización del ZnO usando extractos botánicos

Se han realizado varias investigaciones antes del año 2020 algunos de estos trabajos lo resumimos en el siguiente párrafo y después nos centraremos en trabajos recientes 2021 al 2025.

El uso de la síntesis verde del ZnO tienen aplicaciones en varios campos, incluyendo los descritos por Hernández-Morales et al. (2019) quienes sintetizaron nanopartículas de plata con capacidad antimicrobiana usando extractos de semillas de *Salvia hispanica* L. Opris et al. (2017), sintetizaron nanopartículas de oro usando extractos de *Sambucus nigra* L. con la capacidad de disminuir el nivel de glucosa en sangre. También reduce los niveles de inflamación y estrés oxidativo inducido por hiperglucemia. Matinise et al. (2018) crearon nanopartículas de óxido de hierro-zinc ayudadas por extracto de *Moringa Oleifera*, con excelente desempeño electroquímico, lo que sugiere un gran potencial en esta área. Lebaschi et al. (2017), emplearon extractos de *Camellia sinensis* para formar nanopartículas de paladio mostrando una potente aplicación catalítica para la síntesis de biarilos, por reacción de acoplamiento cruzado de Suzuki y también reducción de 4-nitrofenol (4-NP) por NaBH₄. Samari et al. (2018) utilizaron extractos de *Mangifera indica* L. para sintetizar nanopartículas de plata capaces de detectar químicamente iones Hg₂⁺ en agua. Goutam et al. (2018) utilizaron *Jatropha curcas* L. para la síntesis ecológica de óxido de titanio, para la remediación de aguas residuales de curtidurías, e Idrees et al. (2019) trabajaron con extractos de *Sida acuta* para desarrollar nanopartículas de plata que actuaron como inhibidores adecuados de la corrosión del acero dulce en soluciones de H₂SO₂ al 0,1%.

Nguyen, y Nguyen, (2020) utilizaron un método ecológico para la síntesis de nanopartículas de ZnO. El precursor de acetato de zinc se descompuso térmicamente sin añadir ningún agente químico. Los materiales sintetizados se caracterizaron exhaustivamente mediante diversas herramientas analíticas. Los resultados indicaron que los nanomateriales de ZnO sintetizados tienen una estructura de wurtzita. Los tamaños estimados de cristalito de los materiales obtenidos a 450, 550, 650 y 750 °C (denominados ZnO-450, ZnO-550, ZnO-650 y ZnO-750) fueron 33, 36, 38 y 42 nm, respectivamente. Se reveló que la morfología de los nanomateriales se veía afectada por la temperatura de calcinación, lo que provoca la formación de nanopartículas y nanobarras con diferentes tamaños y formas. Los materiales se aplicaron como fotocatalizadores para la descomposición

del azul de metileno (MB) bajo luz ultravioleta (UV). Los resultados mostraron que la eficiencia de descomposición depende en gran medida del tiempo de exposición a la luz UV, el tamaño y la morfología de los nanomateriales de ZnO. La mayor descomposición de MB (99,4 %) se obtiene al utilizar ZnO-750. La descomposición fotocatalítica sigue la reacción de primer orden. Las constantes de velocidad de reacción correspondientes al proceso de descomposición de MB con presencia de ZnO-450, ZnO-550, ZnO-650 y ZnO-750 son 0,0512, 0,0636, 0,1077 y 0,1286 min⁻¹, respectivamente.

Shaikhaldein et al., (2021), realizaron la síntesis de nano partículas(NP) de ZnO utilizando hojas de *Ochradenus arabicus*., las NP de ZnO se caracterizaron mediante espectroscopia UV-visible (UV-vis), difracción de rayos X (DRX), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y microscopía electrónica de transmisión, que mostró nanopartículas de forma hexagonal con un tamaño que oscilaba entre 10 y 50 nm. Por lo tanto, el estudio descubrió una técnica eficiente, ecológica y sencilla para la biosíntesis de nanopartículas de ZnO multifuncionales utilizando *Ochradenus arabicus*.

Sadig et al., (2021) sintetizaron nanopartículas de ZnO mediante síntesis biogénica, utilizando el extracto de hoja de *Syzygium Cumini* para la síntesis de nanopartículas para la eliminación de la toxicidad del colorante azul de metileno. (AM) con varias propiedades, como propiedades ecológicas, baratas, no tóxicas y de bajo consumo de tiempo. El extracto acuoso de hoja se puso en la solución de ZnO, lo que da como resultado el cambio de color de amarillo a marrón rojizo que indica la reducción de iones de zinc en la solución. Las nanopartículas de ZnO sintetizadas se caracterizaron mediante difracción de rayos X (DRX), microscopio electrónico de barrido (MEB), espectroscopia FTIR y espectrofotómetro UV-Vis. Este método se utilizó para identificar la cristalinidad, la morfología y el grupo funcional responsable de la reducción y el recubrimiento de las nanopartículas de ZnO sintetizadas, así como de su degradación fotocatalítica. La fotocatálisis de las nanopartículas de ZnO sintetizadas se observó mediante la degradación del azul de metileno (MB, un colorante tóxico) bajo la luz solar, siguiendo una cinética de pseudoprimer orden. Las nanopartículas sintetizadas contribuyeron eficazmente a la degradación del colorante MB en casi un 91,4 % a pH 7 y 180 min de exposición, bajo la luz solar. Mediante este método biogénico, las nanopartículas pueden sintetizarse y utilizarse para la eliminación de otros colorantes nocivos.

Faisal et al., (2021) se prepararon nanopartículas de óxido de zinc bioaumentadas (ZnO-NP) a partir de extractos acuosos de fruta de *Myristica fragrans*. Las ZnO-NP se caracterizaron mediante diferentes técnicas. Los cristallitos presentaron un tamaño medio de 41.23 nm, medido mediante DRX, y presentaron una alta pureza. Los análisis de MEB y MET de las ZnO-NP sintetizadas confirmaron su forma esférica o elíptica. Los grupos funcionales responsables de la estabilización y el recubrimiento de las ZnO-NP se confirmaron mediante análisis FTIR. El tamaño ζ y el potencial ζ de las nanopartículas de ZnO sintetizadas se reportaron como 66 nm y -22.1 mV, respectivamente, lo que permite considerarlas una solución coloidal moderadamente estable. Las nanopartículas sintetizadas se utilizaron para evaluar sus posibles propiedades antibacterianas, antidiabéticas, antioxidantes, antiparasitarias y larvicidas. Se observó una alta actividad de las nanopartículas contra cepas bacterianas, tanto recubiertas con antibióticos como solas. *Klebsiella pneumoniae* resultó ser la cepa más sensible a las nanopartículas ($27 \pm 1,73$) y a las nanopartículas recubiertas con imipinem ($26 \pm 1,5$). Las nanopartículas de ZnO mostraron un potencial inhibidor excepcional contra las enzimas proteína quinasa ($12,23 \pm 0,42$), α -amilasa ($73,23 \pm 0,42$) y α -glucosidasa ($65,21 \pm 0,49$). En general, las nanopartículas sintetizadas mostraron una actividad larvicida significativa ($77,3 \pm 1,8$) contra *Aedes aegypti*, el mosquito transmisor del dengue. De igual manera, se observó una gran actividad leishmanicida contra las formas promastigote ($71,50 \pm 0,70$) y amastigote ($61,41 \pm 0,71$) del parásito. Las nanopartículas biosintetizadas resultaron ser excelentes nanomateriales antioxidantes y biocompatibles. Las nanopartículas de ZnO biosintetizadas también se utilizaron como agentes fotocatalíticos, lo que resultó en una degradación del 88 % del colorante azul de metileno en 140 min. Gracias a su síntesis ecológica, su ausencia de toxicidad y su biocompatibilidad, las nanopartículas de ZnO sintetizadas a partir de *M. fragrans* pueden aprovecharse como posibles candidatas para aplicaciones biomédicas y ambientales.

Wijesinghe, et al., (2021) (ORDEN CRONOLÓGICO) fabricaron NP de ZnO utilizando extractos de varias partes de la planta medicinal tradicional *Heliotropium indicum* (*H. indicum*) y evaluar su actividad fotocatalítica. Además, se evaluó su potencial en fotoluminiscencia y transferencia de energía de resonancia de fluorescencia (FRET). El espectro ultravioleta-visible exhibió una banda de absorción desplazada hipsocrómica entre 350 y 380 nm. El análisis de microscopía electrónica de transmisión (TEM) reveló NP esféricas, mientras que

los datos de difracción de rayos X (DRX) revelaron naturaleza wurtzita, hexagonal y cristalina. El TEM y el DRX determinaron consistentemente un rango de tamaño de partícula promedio de 19 a 53 nm. La degradación fotocatalítica alcanza un máximo del 95% para las nanopartículas de ZnO biogénicas mediante el monitoreo espectrofotométrico de la degradación del colorante azul de metileno ($\lambda_{\max} = 662.8$ nm) bajo irradiación solar. El análisis de fotoluminiscencia reveló espectros diferenciados con picos de emisión de alta intensidad para las nanopartículas de ZnO biogénicas en comparación con las nanopartículas de ZnO sintetizadas químicamente. Finalmente, la mayor eficiencia de FRET (80%) se encontró en las nanopartículas de ZnO sintetizadas a partir de las hojas.

Padhiari et al., (2022), investigaron numerosos métodos químicos y físicos para la síntesis de materiales fotocatalíticos, pero los métodos sintéticos ecológicos, como una ruta ambientalmente benigna que utiliza diferentes sustratos naturales como microorganismos, enzimas, bacterias y extractos de plantas, se consideran potencialmente alternativas ecológicas en comparación con las técnicas químicas o físicas. Actualmente, el ZnO, el TiO_2 , diversos sulfuros metálicos y nanomateriales basados en $\text{g-C}_3\text{N}_4$ y sus compuestos se investigan ampliamente como fotocatalisis.

Se investigaron los métodos de síntesis ecológica y biológica de ZnO, TiO_2 , varios sulfuros metálicos y materiales basados en nitruro de carbono grafítico ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) y sus aplicaciones fotocatalíticas. Por ejemplo, Jiang et al., (2014) informaron sobre un nuevo enfoque sintético que emplea hojas de bambú como fuentes tanto de dopante C/N como de reductor para la formación de TiO_2 codopado C/N modificado con Ag y $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ($\text{Ag/CNeTiO}_2@ \text{g-C}_3\text{N}_4$).

En este caso, el compuesto ternario presenta una estructura jerárquica y una gran área superficial, lo que aumenta el área de contacto de los reactivos.

Se llevó a cabo la degradación de RhB y la generación de hidrógeno para evaluar la actividad fotocatalítica de muestras recién preparadas bajo irradiación de luz visible. Se encontró que, con respecto a los catalizadores simples y binarios, el compuesto ternario $\text{Ag/CNeTiO}_2@ \text{g-C}_3\text{N}_4$ muestra la mayor actividad fotocatalítica (degradación de RhB, evolución de H_2 por la descomposición del agua) como resultado de la rápida generación, separación y transporte de los portadores fotogenerados

Orantes et al. (2023) realizó la síntesis verde del

semiconductor ZnO:Mg utilizando únicamente extracto de las partes de la planta *T. diversifolia* como agente reductor. El material sintetizado presentó principalmente la fase ZnO que primeramente fue identificada en el estudio de difracción de rayos X. Fue posible incorporar impurezas de Mg para formar el semiconductor ZnO:Mg.

En los espectros de identificación de ZnO obtenidos de la biosíntesis con extractos de Hoja, Tallo y Flor de *T. diversifolia* se detectaron 70 planos, característicos de Zn y O. La NP sintetizada, la de menor tamaño, fue la realizada a partir de la flor, con 18.24 nm. Teniéndose un tamaño promedio de partícula de 20.13 nm, por medio de la utilización de la plata *T. diversifolia*.

En los resultados arrojados por el SEM, se observaron tamaños de partícula similares a los arrojados por medio de la difracción de rayos X.

Los resultados a partir del EDS arrojaron la presencia de Zinc, Oxígeno y Magnesio, en los 3 análisis. Para la síntesis a partir de la Flor, el espectro mostró un pico de absorción a una longitud de onda de alrededor de 367 nm, que puede atribuirse a la absorción intrínseca de la banda prohibida. El valor del ancho de banda prohibida fue de 3.16 eV, lo que concuerda con algunos valores informados en la literatura.

Golli y Dridi, (2023) usaron nano partículas de óxido de zinc (NP de ZnO) como fotocatalizador, haciendo uso del extracto de hojas de *Moringa oleifera* como agente reductor y estabilizador, como resultados se encontró la formación de nano partículas cristalinas de wurtzita, con un tamaño promedio de aproximadamente 14 nm y forma relativamente esférica. Estas nanopartículas se caracterizaron y validaron mediante diversas técnicas de caracterización, como la difracción de rayos X, la microscopía electrónica de transmisión, la microscopía electrónica de barrido por emisión de campo y la espectroscopia de rayos X de energía dispersiva. Los resultados revelan que, bajo iluminación, las nanopartículas (NP) de ZnO biosintetizadas exhiben un rendimiento fotocatalítico en la descomposición eficaz de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales sintéticas del petróleo. El análisis fotoquímico ilustra además la eficiencia de degradación del ZnO verde, que, en 180 min de irradiación, resultó en una eliminación del 52 % y 93 % de fenol y O-cresol. En condiciones óptimas de carga, las nano partículas producidas mediante la síntesis ecológica presentan un mejor rendimiento en comparación con el ZnO sintetizado químicamente. Esta mejora significativa

en la actividad foto catalítica subraya el potencial de los métodos de síntesis ecológicos para lograr una mayor eficiencia en el tratamiento del agua.

Ali, et al., (2023) revisaron los métodos de síntesis ecológica de nanoestructuras de ZnO, con énfasis en enfoques ecológicos y sostenibles que minimizan el impacto ambiental. Se analizan diversas técnicas de síntesis ecológica, como los métodos mediados por plantas, biológicos y químicos ambientalmente benignos, destacando sus ventajas sobre los procesos convencionales. Además, la revisión explora las aplicaciones de las nanoestructuras de ZnO en células solares sensibilizadas con colorante (DSSC) y fotocatalisis. Además, se investigó las propiedades fotocatalíticas de las nanoestructuras de ZnO, con especial atención a su capacidad para degradar contaminantes orgánicos y su potencial en el tratamiento de aguas residuales y la purificación del aire. Se analizan críticamente los mecanismos fotocatalíticos y los factores que influyen en la eficiencia de las nanoestructuras de ZnO en estos procesos.

Esta revisión presento una visión general de los métodos de síntesis ecológica de vanguardia para nanoestructuras de ZnO y analiza sus aplicaciones en DSSC y fotocatalisis. El carácter ecológico de estos enfoques de síntesis y las capacidades multifuncionales de las nanoestructuras de ZnO las convierten en candidatas prometedoras para la conversión de energía sostenible y las tecnologías de remediación ambiental. Sin embargo, también se destacan los desafíos y las perspectivas futuras en este campo para orientar la investigación y el desarrollo en esta área.

Mongy y Shalaby (2024), utilizaron el extracto de fruto de *R. Coriaria* como agente reductor y de recubrimiento, obteniéndose nano partículas de ZnO de color verde, lo cual se atribuye al extracto utilizado.

La caracterización reveló que las NP de ZnO biosintetizadas presentaron una absorbancia máxima de aproximadamente 359 nm y se asemejaron mucho a la estructura cristalina hexagonal de la wurtzita de ZnO, con un tamaño cristalino promedio de 16,69 nm.

El estudio de microscopia de barrido mostró la presencia de morfologías esféricas y hexagonales, con un tamaño de grano promedio de $20,51 \pm 3,90$ nm.

El extracto de fruto de *R. coriaria* representa una opción excelente y ecológica para la biosíntesis

de nanopartículas de ZnO. Desempeña una doble función: actúa como agente reductor y estabilizador, lo que facilita la síntesis de las nanopartículas. Inicialmente, la formación de nanopartículas de ZnO se confirmó mediante la observación visual del cambio de color de la solución a gris amarillento, seguido de blanquecino.

Mousa et. al., (2024) sintetizaron con éxito nanopartículas de óxido de zinc (NP de ZnO) utilizando diversos extractos de plantas, granada (P.M), raíces de remolacha (B.S) y séder, mediante un proceso químico. Los resultados indicaron que la composición del extracto vegetal afecta diversas características de las partículas producidas, como sus propiedades fotocatalíticas, la banda prohibida de energía (Eg), el tamaño de partícula y la relación entre los planos cristalinos de intensidad (0 0 2) y (1 0 0). El tamaño de partícula de las nanopartículas producidas varía entre 20 y 30 nm. Para examinar la actividad fotocatalítica de las nanopartículas en presencia de luz UV, se utilizó naranja de metilo (MO). La Eg de ZnO sintetizada por el método químico fue de 3,16 e. V, mientras que fue de 2,84, 2,63 y 2,59 para los extractos de P.M., Seder y B.S., respectivamente. Las nanopartículas de ZnO más eficaces, sintetizadas utilizando remolacha, mostraron una eficiencia de degradación del $87 \pm 0,5$ % con una constante de velocidad cinética de $0,007 \text{ min}^{-1}$. También se examinó la relación de los dos planos cristalinos de intensidad (0 0 2) y (1 0 0) para determinar una orientación específica en (0 0 2) que está vinculada a la producción de vacantes de oxígeno en ZnO, lo que mejora su eficiencia fotocatalítica. Además, el aumento de la eficacia fotocatalítica se puede atribuir a la mejor absorción de luz por parte de los estados de banda prohibida y a la transferencia de carga efectiva.

Pal, et al., (2024) sintetizaron nanopartículas de ZnO, simbolizadas como D-ZnONP y M-ZnONP, utilizando las hojas de *D. indica* y *M. micrantha*, respectivamente, y se estudió su impacto en la inhibición del crecimiento de diversas cepas bacterianas y en la fotocatálisis.

Al mostrar la distintiva banda de resonancia de plasmón superficial (SPR) a 373 nm en UV-Vis y las bandas a 450–480 cm^{-1} correspondientes al estiramiento de Zn–O, la espectroscopia FTIR impartió la formación de ZnONP, que fue respaldada además por el análisis de difracción de rayos X al mostrar la naturaleza policristalina y una estructura de wurtzita hexagonal.

La forma esférica y el tamaño promedio de partícula de 30 nm de los ZnONP producidos, confirmados

por microscopía electrónica, también confirman su cristalinidad. Bajo la luz solar natural, ambos ZnONP demuestran una excelente eficacia de degradación, del 96 al 99 % en 100 min, frente al azul de metileno (MB). Además, cabe destacar que ambos ZnONP sintetizados mostraron una eficacia del 55 al 60 % frente a los antibióticos para inhibir el crecimiento de diversas cepas bacterianas patógenas. En general, los ZnONP pueden producirse a gran escala a partir de fuentes vegetales y emplearse como componentes destacados en la remediación ambiental y las industrias cosméticas.

Ulker, et al., (2025) sintetizaron nanopartículas de ZnO usando la planta *Tilia Tomentosa* (Tilo Plateado) y las propiedades de las nanopartículas sintetizadas se revelaron mediante análisis FT-IR, XRD, UV-DRS y SEM-EDX. Según el análisis XRD, se observó que las nanopartículas de ZnO tenían una estructura cristalina hexagonal, 85.31% de cristalinidad, el tamaño promedio estimado de los cristallitos es de 93.33 nm y las nano partículas de ZnO obtenidas fueron manométricas por análisis SEM. La foto degradación del colorante azul de metileno por método fotocatalítico se estudió utilizando nanopartículas de ZnO bajo luz UV y visible. Como resultado, se logró una degradación del 99,6 % del colorante azul de metileno para ZnO (0,1 g/200 ml) y una concentración inicial de azul de metileno de 3 mg/L. En conclusión, se observó que las nanopartículas de ZnO sintetizadas con éxito mediante el método de síntesis ecológica pueden utilizarse para la eliminación de contaminantes orgánicos colorantes en aguas residuales industriales. De esta manera, el uso de nanopartículas de ZnO, rentables y ecológicas, como fotocatalizadores mediante el método fotocatalítico resultará ventajoso para las empresas.

Samadi, et al., (2025), analizaron los avances recientes en la síntesis ecológica de ZnO-NP, la actividad fotocatalítica y sus aplicaciones biomédicas.

Además, se ha investigado el rendimiento subóptimo de los dispositivos solares que incorporan nanopartículas de óxido de zinc. Esta eficiencia limitada se atribuye principalmente a una pasivación superficial insuficiente, una recombinación de carga significativa en las interfaces de contacto y la ausencia de un equilibrio termodinámico estable dentro del sistema.

Las nanopartículas de ZnO se consideran la opción preferida para la imagenología médica, especialmente en el contexto de las técnicas de tratamiento del cáncer. Los usos potenciales de las

nanopartículas de ZnO abarcan el desarrollo de textiles antibacterianos, la creación de biosensores electroquímicos rentables y ambientalmente sostenibles, y un potente agente capaz de combatir patógenos bacterianos resistentes a los antibióticos. De cara al futuro, la optimización de protocolos escalables de síntesis ecológica y la resolución de problemas de biocompatibilidad serán fundamentales para traducir los hallazgos a escala de laboratorio en aplicaciones prácticas en el ámbito de la salud y la tecnología sostenible.

Zu y Wang, (2025) realizaron una revisión del uso del óxido de zinc como material funcional usado cada vez más en el ámbito académico como en la industria, especialmente en el actual cambio de paradigma energético hacia fuentes limpias y renovables.

Los autores proporcionan un resumen general del estado actual de las nanoestructuras de ZnO, las estrategias de síntesis y los enfoques de modificación, con el foco principal en diversas aplicaciones de fotocatalisis, sirviendo como introducción, referencia e inspiración para futuras investigaciones.

Purushotham et al., en el 2025 biosintetizó nanopartículas de óxido de zinc (ZnO-NP) a partir del extracto de hoja de *Pavonia zeylanica* (Pz), una planta con un importante valor medicinal, y se evaluó sus propiedades fotocatalíticas frente al azul de metileno (MB), un colorante azoico (100 mg L⁻¹, pH 7), mediante irradiación solar, junto con la medición de su reutilización y eficiencia de mineralización.

La caracterización de las Pz-ZnO-NP mostró un pico de absorbancia a 313 nm, con un valor de banda prohibida de 3,04 eV y un tamaño de 19,58 nm. Los resultados de este estudio muestran que las nanopartículas de Pz-ZnO sintetizadas, tras el tratamiento con colorante MB tras 2 h de irradiación solar, mostraron una degradación del 89,32 %, dependiente de la concentración y con una cinética de pseudoprimer orden. Los estudios de reutilización indicaron que las nanopartículas de Pz-ZnO fueron capaces de degradar el colorante MB tras cinco ciclos repetidos de uso. La composición estructural de las nanopartículas de Pz-ZnO, evaluada mediante difracción de rayos X (DRX), mostró que la posición del pico se mantuvo constante. Sin embargo, la intensidad del pico disminuyó, lo que indica que la estructura cristalina de las nanopartículas de ZnO no se vio afectada. Además, estudios avanzados del proceso de oxidación, que incluyeron la evaluación de la DQO y el COT, revelaron que ambos contenidos

disminuyeron significativamente durante el proceso de fotocatalisis, en el que los colorantes orgánicos ricos en electrones se convirtieron en productos no tóxicos mediante mineralización.

Tangjaideborisu et al., (2025) utilizaron extracto de cáscara de nuez de macadamia como agente estabilizador y protector natural para la síntesis sostenible y respetuosa con el medio ambiente de nanopartículas de óxido de zinc (NP de ZnO) y NP de óxido de cobre (NP de CuO). Los compuestos naturales presentes en el extracto de cáscara de nuez de macadamia facilitan la formación de estas NP. Las NP de ZnO y CuO sintetizadas se confirmaron mediante diversos tipos de técnicas espectroscópicas y microscópicas. El análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmó que las NP de ZnO exhibieron una estructura hexagonal de wurtzita, mientras que las NP de CuO mostraron una estructura reticular cúbica centrada en las caras. Las NP sintetizadas ecológicamente demostraron excelentes propiedades antioxidantes y antimicrobianas contra bacterias grampositivas y gramnegativas. Además, se evaluó la eficiencia fotocatalítica de las nanopartículas mediante el examen de la degradación de la tetraciclina, donde el ZnO demostró un rendimiento superior al CuO. Se probaron las actividades antimicrobianas de las nanopartículas de ZnO y CuO contra *Staphylococcus aureus* (cepa 902), *Escherichia coli* (cepa 443), *Aspergillus niger* y *Candida albicans*, obteniéndose resultados prometedores. Además, tanto las nanopartículas de ZnO como las de CuO mostraron efectos sinérgicos al combinarse con antibióticos. Las nuevas nanopartículas de ZnO y CuO sintetizadas de forma ecológica son sencillas, rentables, respetuosas con el medio ambiente y se utilizan en diversas aplicaciones, como el envasado de alimentos, los biosensores y la catálisis en reacciones farmacéuticas.

Thiam et al., (2025), sintetizaron nanopartículas de ZnO utilizando extracto de hoja de *Licania tomentosa Benth* (también conocida como Oiti), investigando la degradación fotocatalítica del colorante violeta cristal (CV) catalizada por las NP de ZnO obtenidas y evaluaron la eficiencia del proceso de fotodegradación. Las nanopartículas sintetizadas tienen un tamaño medio de cristalito de 12,4 nm, medido por DRX, y una forma esférica, revelada por MEB. Estudios UV-Vis muestran que las nanopartículas de ZnO presentan una banda prohibida relativamente pequeña, de 2,75 eV, estimada mediante el diagrama de Tauc. Las pruebas de fotodegradación con nanopartículas de ZnO verdes sintetizadas mostraron que aproximadamente el 79 % del colorante de CV se descompone en 2 h

tras su exposición a la radiación UV en condiciones experimentales. La fotodescomposición del CV se ve afectada por diversos factores, como la banda prohibida y la carga del catalizador, el pH y la intensidad de la luz. Además, se determinó la carga óptima del fotocatalizador. El estudio reveló que el extracto de hoja de Oiti puede utilizarse eficazmente para la síntesis de nanopartículas de ZnO, lo que presenta un gran potencial para aplicaciones de fotodegradación.

Mahajan et al., (2025) lograron obtener el tamaño de partícula/cristalito más pequeño de nanopartículas de óxido de zinc (NP de ZnO) reportado hasta la fecha, midiendo 5.2/12.41 nm con extracto de hoja de *Justicia adhatoda* (*J. adhatoda*), este estudio introdujo una síntesis verde fácil. Utilizando extracto acuoso de hoja de *J. adhatoda* como agente reductor y estabilizador, el método aprovecha la rica composición fitoquímica de la planta para producir NP de ZnO altamente cristalinas y morfológicamente controladas. Este control preciso del tamaño de partícula resalta la efectividad del proceso de síntesis en el ajuste morfológico. Se evaluó el rendimiento fotocatalítico de estas nanopartículas biogénicas de ZnO para la degradación de dos contaminantes modelo: verde malaquita (MG), un colorante sintético, y 4-nitrofenol (4-NP), un compuesto orgánico tóxico. Las nanopartículas exhibieron una eficiencia fotocatalítica excepcional, logrando una degradación del 99,8 % de MG en 180 minutos y demostrando una rápida reducción fotocatalítica de 4-NP a 4-aminofenol con una constante de velocidad de reacción de 0,245 min⁻¹ bajo radiación UV y solar. Estudios mecanísticos atribuyeron este alto rendimiento a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y a las interacciones de pares electrón-hueco, respaldadas por una mejor separación de cargas y una alta área superficial. Este trabajo no solo establece el potencial de las nanopartículas de ZnO mediadas por *J. adhatoda* para abordar contaminantes orgánicos persistentes, sino que también establece un punto de referencia para la síntesis de nanopartículas de tamaño controlado.

Ounis et al., (2025). Sintetizaron nanopartículas de óxido de zinc (NP de ZnO) mediante un método de precipitación sencillo y ecológico, empleando un agente de recubrimiento derivado de semillas de chía (*Salvia hispanica*). El análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmó la formación de ZnO con una estructura cristalina hexagonal y un tamaño promedio de cristalito inferior a 30 nm. La microscopía electrónica de barrido (MEB) reveló morfologías distintivas, cuasi esféricas y similares a nanovarillas, mientras que la espectroscopia de

rayos X por dispersión de energía (EDX) verificó la presencia de zinc y oxígeno. La espectroscopia de reflectancia difusa (EDR) indicó una actividad significativa en la región UV, con las nanopartículas presentando una banda prohibida de 3,25 eV. Se evaluó la eficiencia fotocatalítica de las nanopartículas de ZnO sintetizadas mediante su capacidad para degradar diclofenaco sódico (DCF) y paranitrofenol (4-nitrofenol, PNP) bajo irradiación UV-LED, logrando tasas de eliminación de contaminantes superiores al 98 %. El mecanismo de degradación se aclara mediante una caracterización detallada de los intermediarios de reacción. Estos hallazgos resaltan el potencial de las nanopartículas de ZnO sintetizadas a partir de extracto de semilla de chía para la remediación ambiental eficaz de contaminantes farmacéuticos y orgánicos.

López-López, (2025) estudiaron el uso de la flor de sempachochtl (*Tagetes erecta*) en la síntesis del ZnO-Ag mediante el método de precipitación. Estos evaluaron sistemáticamente el efecto de la concentración de plata (0,1-0,5 %) en las propiedades del material y sus aplicaciones duales: degradación fotocatalítica solar del azul de metileno y actividad antibacteriana contra bacterias grampositivas (*Staphylococcus aureus*) y gramnegativas (*Escherichia coli*). Técnicas avanzadas de caracterización, como UV-Vis, XRD, TEM, FTIR y TGA, confirmaron la formación exitosa de nanocompuestos cristalinos con morfologías esféricas y hemisféricas, compuestos por fases de ZnO wurtzita hexagonal y Ag cúbica centrada en las caras. Los resultados demuestran que la incorporación estratégica de plata mejora significativamente la actividad fotocatalítica del ZnO al mejorar la separación de cargas y reducir las tasas de recombinación. El nanocompuesto de ZnO-Ag (0,3%) mostró un rendimiento óptimo, logrando la degradación completa del azul de metileno en 25 minutos bajo irradiación solar. Los ensayos antibacterianos mostraron eficacia contra las bacterias utilizadas, con un efecto bactericida significativamente mayor contra *S. aureus* que contra *E. coli*, especialmente para ZnO-Ag (0,2%) a una concentración de 250 µg/mL. Este estudio destaca el efecto sinérgico entre ZnO, Ag y los compuestos bioactivos de *Tagetes erecta*, ofreciendo un enfoque sostenible para el desarrollo de nanomateriales.

4. Conclusiones

La síntesis verde del ZnO es viable, se han empleado una gran variedad de plantas, semillas, hojas y frutos para la síntesis de nanopartículas de ZnO, lo cual ayuda a tener unas mejores características de éstas no influyendo en su forma cristalina si no en el

Logrando tener una mejor eficiencia de fotodegradación en algunos casos comparados con una síntesis normal de estas nano partículas.

La síntesis verde reduce el uso de sustancias químicas. Las pocas que se emplean provienen de compuestos naturales, una característica que les otorga una ventaja considerable a estos métodos de síntesis.

Se revisaron varios trabajos los cuales están resumidos en la tabla 1., en la cual observamos los trabajos presentado en este review., donde se

identificados que planta, hoja, semilla o fruta fue utilizado.

Se observa que muchas plantas, semillas y hojas pueden ser utilizadas de las regiones donde son desarrollados los trabajos, las cuales crean las condiciones idóneas para la síntesis, en este caso en específico para síntesis del óxido de zinc, y también confiere este proceso de síntesis en las características físicas de la nanopartículas sintetizadas.

La síntesis verde del óxido de zinc presenta un gran potencial en la obtención de nanopartículas estables y con grandes propiedades.

Tabla 1. Concentrado de los trabajos reportados en la síntesis verde el óxido de zinc.

Año	Autor	Tipo de planta, hoja semilla o fruta
2025	López-López et al.	<i>sempaxochtl (Tagetes erecta)</i>
	Ounis et al., en el 2025.	<i>Semilla de chia(Salvia hispánica).</i>
	MAhajan et al., en el 2025	<i>hoja de Justicia adhatoda (J. adhatoda),</i>
	Thiam et al., en el 2025	<i>Hoja de Licania tomentosa Benth (también conocida como Oiti)</i>
	Tangjaideborisu et al., en el 2025	<i>extracto de cáscara de nuez de macadamia</i>
	Purushotham et al., en el 2025	<i>hoja de Pavonia zeylanica (Pz)</i>
2024	Ulker, et al., en el 2025	<i>la planta Tilia Tomentosa (Tilo Plateado)</i>
	Pal, et al., en el 2024	<i>hojas de D. indica y M. micrantha</i>
	Mousa et. al., en el 2024	<i>de plantas, granada (P.M), raíces de remolacha (B.S) y séde</i>
2023	Mongy y Shalaby en el 2024	<i>fruto de R. coriaria</i>
	Orantes et al. 2023	<i>planta T. diversifolia</i>
	Golli y Dridi, en el 2023	<i>hojas de Moringa oleifera</i>
2021	Wijesinghe, et al., en el 2021	<i>Heliotropium indicum (H. indicum)</i>
	Faisal et al., en el 2021	<i>dfruta de Myristica fragrans</i>
	2021 Sadig et al.	<i>hoja de Syzygium Cumini</i>
	Shaikhaldein et al en el 2021	<i>hojas de Ochradenus arabicus</i>
2014	Jiang et al. (2014)	<i>hojas de bambú</i>

5. Agradecimientos

No Aplica.

6. Declaración de conflicto de interés

Sin conflicto de intereses

Referencias

Ali, J., Bibi, S., Jatoi, W. B., Tuzen, M., Jakhrani, M. A., Feng, X., & Saleh, T. A. (2023). Green synthesized zinc oxide nanostructures and their applications in dye-sensitized solar cells and photocatalysis: A review. *Materials Today Communications*, 36, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106840>

Alprol, A.E., Eleryan, A., Abouelwafa, A. et al. (2024). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Padina pavonica extract for efficient pho-

tocatalytic removal of methylene blue. *Sci Rep* 14, 32160. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80757-9>

Bonilla Salgado, L. (2024). Síntesis verde de nanopartículas de ZnO a partir de jugo de limón. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/23364>

Bouttier-Figueroa, D. C., Cortez-Valadez, M., Flores-Acosta, M., & Robles-Zepeda, R. E. (2023). Synthesis of metallic nanoparticles using plant's natural extracts: Synthesis mechanisms and applications. *Journal of Biological and Health Sciences*. <http://biotecnia.unison.mx>

Doria Serrano, M. del C. (2009). Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación Química*, 20(4), 412-420. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30044-2](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30044-2)

El Golli, A., Contreras, S. y Dridi, C. (2023). Nanopartículas de ZnO biosintetizadas y fotocatalisis impulsada por la luz solar para un tratamiento sintético de aguas residuales de refineries de petróleo, respetuoso con el medio ambiente y sosten-

- nible. *Sci Rep* 13, 20809 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47554-2>
- Faisal, S., Jan, H., Shah, S. A., Shah, S., Khan, A., Akbar, M. T., Rizwan, M., Jan, F., Wajidullah, Akhtar, N., Khattak, A., & Syed, S. (2021). Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using aqueous fruit extracts of *Myristica fragrans*: Their characterizations and biological and environmental applications. *ACS Omega*, 6(14), 9709-9722. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00310>
- Goutam, Surya Pratap, Gaurav Saxena, Varunika Singh, Anil Kumar Yadav, Ram Naresh Bharagava, and Khem B. Thapa. (2018). Green Synthesis of TiO₂ Nanoparticles Using Leaf Extract of *Jatropha curcas* L. for Photocatalytic Degradation of Tannery Wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 386–96. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.029>
- Hernández-Morales, Liliana, Heriberto Espinoza-Gómez, Lucía Z. Flores-López, Erika Lis Sotelo-Barrera, Alfredo Núñez-Rivera, Rubén Darío Cadena-Nava, Gabriel Alonso-Núñez, and Karla Alejandra Espinoza. (2019). Study of the Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using a Natural Extract of Dark or White *Salvia hispanica* L. Seeds and Their Antibacterial Application. *Applied Surface Science* 489 (June): 952–61. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.031>
- Idrees, Muhammad, Saima Batool, Tanzila Kalsoom, Sadaf Raina, Hafiz Muhammad Adeel Sharif, and Summera Yasmeen. (2019). Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using *Sida acuta* Extract for Antimicrobial Actions and Corrosion Inhibition Potential. *Environmental Technology (United Kingdom)* 40 (8): 1071–78. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1435738>
- Jiang, Z., Liu, D., Jiang, D., Wei, W., Qian, K., Chen, M., & Xie, J. (2014). Bamboo leaf-assisted formation of carbon/nitrogen co-doped anatase TiO₂ modified with silver and graphitic carbon nitride: Novel and green synthesis and cooperative photocatalytic activity. *Dalton Transactions*, 43, 13792-13802. <https://doi.org/10.1039/C4DT00784J>
- Lebaschi, Sadaf, Malak Hekmati, and Hojat Veisi. (2017). Green Synthesis of Palladium Nanoparticles Mediated by Black Tea Leaves (*Camellia sinensis*) Extract: Catalytic Activity in the Reduction of 4-Nitrophenol and Suzuki-Miyaura Coupling Reaction under Ligand-Free Conditions. *Journal of Colloid and Interface Science* 485: 223–31. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.09.027>
- López-López, J. R., Hernández-Chávez, M. A., López-López, M. de J., Tejeda-Ochoa, A., Cervantes-Gaxiola, M. E., Parra-Unda, J. R., Valenzuela-Ramírez, G. G., Flores-Villaseñor, H., León-Sicairos, N., Canizalez-Roman, A., Herrera-Ramírez, J. M., & Méndez-Herrera, P. F. (2025). *Tagetes erecta*—Mediated green synthesis of ZnO–Ag nanocomposites: Characterization and dual applications in solar photocatalytic degradation and antibacterial activity. *Ceramics*, 8(2), 45. <https://doi.org/10.3390/ceramics8020045>
- Mahajan, M., Kumar, S., Gaur, J., Kaushal, S., Dalal, J., Singh, G., Misra, M., & Ahlawat, D. S. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Justicia adhatoda* for photocatalytic degradation of malachite green and reduction of 4-nitrophenol. *RSC Advances*, 15, 2958-2980. <https://doi.org/10.1039/D4RA08632E>
- Matinise, N., K. Kaviyarasu, N. Mongwaketsi, S. Khamlich, L. Kotsedi, N. Mayedwa, and M. Maza. (2018). “Green Synthesis of Novel Zinc Iron Oxide (ZnFe₂O₄) Nanocomposite via *Moringa oleifera* Natural Extract for Electrochemical Applications.” *Applied Surface Science* 446: 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.187>
- Mongy, Y., Shalaby, T. (2024). Green: Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc mediante extracto de *Rhus coriaria* y su actividad anticancerígena contra células de cáncer de mama triple negativo. *Sci Rep* 14, 13470 <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63258-7>
- Mousa, S.A., Wissa, D.A., Hassan, H.H. et al. (2024). Enhanced photocatalytic activity of green synthesized zinc oxide nanoparticles using low-cost plant extracts. *Sci Rep* 14, 16713. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66975-1>
- Nguyen, N. T., & Nguyen, V. A. (2020). Synthesis, characterization, and photocatalytic activity of ZnO nanomaterials prepared by a green, nonchemical route. *Journal of Nanomaterials*. <https://doi.org/10.1155/2020/1768371>
- Opris, Razvan, Corina Tatomir, Diana Olteanu, Remus Moldovan, Bianca Moldovan, Luminita David, Andras Nagy, Nicoleta Decea, Mihai Ludovic Kiss, and Gabriela Adriana Filip. (2017). The Effect of *Sambucus nigra* L. Extract and Phytosynthesized Gold Nanoparticles on Diabetic Rats. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 150: 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.11.033>
- Orantes-Calleja, P. D., Borrás-Enríquez, A. J., López-De Paz, P., Venegas-López, O., & Gamboa-Sánchez, S. A. (2023). Biosíntesis de nanopartículas de ZnO usando extractos del tallo, hoja y flor de *Tithonia diversifolia*. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad (TERYS)*, 2(1), 58-59.
- Ounis Dkhil, Y., Peppel, T., Sebek, M., Strunk, J., & Houas, A. (2025). Green synthesis of photocatalytically active ZnO nanoparticles using chia seed extract and mechanistic elucidation of the photodegradation of diclofenac and p-nitrophenol. *Catalysts*, 15(1), 4. <https://doi.org/10.3390/catal15010004>
- Padhiari, S., Mishra, M., & Hota, G. (2022). Green synthesis of nanomaterials for photocatalytic application. En S. Thomas, N. Kalarikkal, & A. R. Abraham (Eds.), *Design, fabrication, and characterization of multifunctional nanomaterials* (Cap. 17, pp. 373-398). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820558-7.00006-6>
- Pal, P. K., Sarifujjaman, M., Saha, P., Rahman, S. M. M., Islam, M. E., Ahmmad, B., Karim, K. M. R., &

- Mahiuddin, M. (2024). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Dillenia indica* and *Mikania micrantha* leaf extracts: Applications in photocatalysis and antibacterial activity. *ChemistryOpen*, 13(12), e202400102. <https://doi.org/10.1002/open.202400102>
- Purushotham, D., Ramesh, A. M., Thimmappa, D. S., Kalegowda, N., Gajendramurthy, G. H., Kollur, S. P., & Mahadevamurthy, M. (2025). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous extract of *Pavonia zeylanica* to mediate photocatalytic degradation of methylene blue: Studies on reaction kinetics, reusability and mineralization. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(10), 4739. <https://doi.org/10.3390/ijms26104739>
- Sadiq, H., Sher, F., Sehar, S., Lima, E. C., Zhang, S., Iqbal, H. M. N., Zafar, F., & Nuhanović, M. (2021). Green synthesis of ZnO nanoparticles from *Syzygium cumini* leaves extract with robust photocatalysis applications. *Journal of Molecular Liquids*, 335, 116567. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116567>
- Samadi, H., Zarei Mohgadam, R., & Gholipour Shahraki, M. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles, photocatalyst activity and its biomedical applications: A review. *Materials Chemistry and Physics*, 345, 131161. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131161>
- Samari, Fayeze, Hossein Salehipoor, Ebrahim Eftekhari, and Saeed Yousefinejad. (2018). Low-Temperature Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using Mango Leaf Extract: Catalytic Effect, Antioxidant Properties, Anticancer Activity and Application for Colorimetric Sensing. *New Journal of Chemistry* 42 (19): 15905–16. <https://doi.org/10.1039/C8NJ03156H>.
- Shaikhaldin, H. O., Al-Qurainy, F., Khan, S., Nadeem, M., Tarroum, M., Salih, A. M., Gaafar, A.-R. Z., Alshameri, A., Alansi, S., Aleneziy, N. A., & Alfarraj, N. S. (2021). Biosíntesis y caracterización de nanopartículas de ZnO utilizando *Ochrade-nus arabicus* y su efecto sobre el crecimiento y los sistemas antioxidantes de *Maerua oblongifolia*. *Plantas*, 10(9), 1808. <https://doi.org/10.3390/plants10091808>
- Tangjaideborisu, Y., Yugala, P., Phanawansombat, C. et al. (2025). Green synthesis of ZnO and CuO nanoparticles using macadamia nut shell extracts: photocatalytic and antibacterial activities. *Waste Dispos. Sustain. Energy* <https://doi.org/10.1007/s42768-025-00255-0>
- Thiam, M., Bernardo, A. de J., Pellegrini, V. de O. A., Possatto, J. F., Dlamini, Z. W., Mahule, T. S., Ngom, B. D., Mosepele, B. Q., Thema, F. T., Mamba, B. B., Vallabhapurapu, S., Vallabhapurapu, V. S., & Polikarpov, I. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Licania tomentosa* Benth (Oiti) leaf extract: Characterization and applications for the photocatalytic degradation of crystal violet dye. *Processes*, 13(3), 880. <https://doi.org/10.3390/pr13030880>
- Ulker, G., Penlik, Y., & Gorduk, S. (2025). Synthesis, characterization and investigation of photocatalytic activity of ZnO nanoparticles from *Tilia tomentosa* (silverly linden) plant by green synthesis method. *Journal of Molecular Structure*, 1344, 142929. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142929>
- Wijesinghe, U., Thiripuranathar, G., Menaa, F., Iqbal, H., Razzaq, A., & Almukhlifi, H. (2021). Green synthesis, structural characterization and photocatalytic applications of ZnO nanoconjugates using *Heliotropium indicum*. *Catalysts*, 11(7), 831. <https://doi.org/10.3390/catal11070831>
- Zhu C, Wang X. (2025). Nanomaterial ZnO synthesis and its photocatalytic applications: A Review. *Nanomaterials (Basel)*. 15(9):682. doi: 10.3390/nano15090682. PMID: 40358299; PMCID: PMC12073315.

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 28 de octubre de 2025.

Sinergia catalítica en superficie: Triplete $\text{Ti}^{3+}/\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ en Co/TiO_2 como clave para la producción fotocatalítica de alcoholes a partir de CO_2

Montalvo Daniel⁽¹⁾
 Pérez Francisco José Manuel⁽²⁾
 Cruz Valdés Jesús Alonso⁽²⁾
 Jiménez Castillo Ulises⁽²⁾
 Ginés Ruby⁽³⁾
 Montalvo Carlos⁽⁴⁾

RESUMEN

La fotorreducción de CO_2 para la síntesis de alcoholes se enfrenta a desafíos de baja eficiencia y selectividad. Este estudio investiga el uso de fotocatalizadores Co/TiO_2 para la producción selectiva de etanol bajo irradiación UV y visible. Los catalizadores se sintetizaron por impregnación incipiente y se caracterizaron mediante XPS, HR-TEM y UV-Vis. Los resultados revelaron que la alta actividad se atribuye a la presencia de especies superficiales como Ti^{3+} , Co^{2+} y Co^{3+} . Estas especies actúan de manera sinérgica para reducir la energía del band-gap del TiO_2 de 2.98 eV a 2.72 eV, suprimiendo significativamente la recombinación de pares electrón-hueco y mejorando la adsorción y activación de CO_2 e intermediarios clave como el CO. La producción máxima de etanol se alcanzó con el catalizador al 1% Co/TiO_2 bajo una intensidad óptima de 328 W/m^2 , demostrando que un exceso de co-catalizador (10% Co) es perjudicial. Se propone un mecanismo donde la formación acelerada del radical formilo ($\bullet\text{CHO}$) en sitios $\text{Ti}^{3+}/\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ es crucial para la generación de alcoholes C_2 .

Palabras clave

Fotorreducción de CO_2 , selectividad catalítica, estados de oxidación, biocombustibles solares, descarbonización.

Abstract

The photoreduction of CO_2 for alcohol synthesis faces challenges related to low efficiency and selectivity. This study investigates the use of Co/TiO_2 photocatalysts for the selective production of ethanol under UV and visible irradiation. The catalysts were synthesized by incipient impregnation and characterized by XPS, HR-TEM, and UV-Vis. The results revealed that the high activity is attributed to the presence of surface species such as Ti^{3+} , Co^{2+} , and Co^{3+} . These species act synergistically to reduce the TiO_2 band gap energy from 2.98 eV to 2.72 eV, significantly suppressing electron-hole pair recombination and enhancing the adsorption and activation of CO_2 and key intermediates such as CO. Maximum ethanol production was achieved with the 1% Co/TiO_2 catalyst at an optimum intensity of 328 W/m^2 , demonstrating that an excess of co-catalyst (10% Co) is detrimental. A mechanism is proposed where the accelerated formation of the formyl radical ($\bullet\text{CHO}$) at $\text{Ti}^{3+}/\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ sites is crucial for the generation of C_2 alcohols.

Keywords

CO_2 photoreduction, catalytic selectivity, oxidation states, solar biofuels, decarbonization.

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km 16.5, Coatzacoalcos, Veracruz, 96535, México. ⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5, Coatzacoalcos 96536, México. ⁽³⁾ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Tecnológico No. 852 Col. E. Zapata, Orizaba 94320, Veracruz, México. ⁽⁴⁾ Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56, No. 4. Av. Concordia Col. Benito Juárez, Ciudad del Carmen, Campeche, 24180, México.

1. Introducción

El incremento constante en la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO_2), principal gas de efecto invernadero, ha impulsado la búsqueda de tecnologías para su captura y utilización (Pörtner et al., 2022). La fotoreducción catalítica de CO_2 con agua (H_2O), análoga a la fotosíntesis artificial, surge como una estrategia sostenible para convertir un contaminante en combustibles solares y productos químicos de valor añadido, utilizando la energía solar como impulsor (Akhundi et al., 2019; Bard & Fox, 1995).

Entre los diversos semiconductores empleados como fotocatalizadores, el dióxido de titanio (TiO_2) ha sido ampliamente estudiado debido a su alta estabilidad química, baja toxicidad y favorable potencial redox (Rani et al., 2022). No obstante, su aplicación práctica se ve limitada por su amplio band-gap (~ 3.2 eV), que restringe su actividad a la región UV del espectro (aprox. 5% de la luz solar), y por su alta tasa de recombinación de portadores de carga fotogenerados (Nakata & Fujishima, 2012). Para superar estas limitaciones, una estrategia efectiva es la modificación del TiO_2 con metales de transición, que pueden actuar como centros de captura de electrones, extendiendo la respuesta espectral hacia el visible y mejorando la separación de cargas (Asahi et al., 2001; Kumar & Devi, 2011).

Dentro de los metales no nobles, el cobalto (Co) ha demostrado ser un co-catalizador particularmente prometedor debido a su bajo costo, alta estabilidad y capacidad para formar óxidos (CoO , Co_3O_4) con múltiples estados de oxidación (Co^{2+} , Co^{3+}) que facilitan las transferencias electrónicas (Wang et al., 2022). La deposición de especies de cobalto sobre TiO_2 ha mostrado mejorar la actividad en reacciones de fotorreducción, aunque la selectividad hacia productos específicos, particularmente alcoholes superiores, sigue siendo un desafío (Ola & Maroto-Valer, 2015; Tahir & Amin, 2013).

La producción fotocatalítica de alcoholes como el etanol es de gran interés, ya que estos compuestos poseen un alto índice de octano y pueden ser utilizados como aditivos o componentes de combustibles líquidos, ofreciendo una alternativa renovable a los derivados del petróleo (Ghadikolaei et al., 2021). Sin embargo, la formación de estos productos requiere de mecanismos de reacción complejos que involucran múltiples transferencias de electrones y protones y la dimerización de intermediarios de carbono (Ji & Luo, 2016).

En este contexto, el presente estudio se centra en

el desarrollo de fotocatalizadores Co/TiO_2 para la producción selectiva de etanol. Se investiga sistemáticamente el papel de los estados de oxidación superficiales (Ti^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+}) en la actividad y selectividad. Se evaluó el efecto de la carga metálica y el tipo de irradiación. Finalmente, se propone un mecanismo de reacción coherente con los productos detectados.

2. Metodología

2.1. Síntesis de fotocatalizadores

Los fotocatalizadores de Co/TiO_2 se prepararon mediante el método de impregnación incipiente. Se utilizó TiO_2 comercial (Degussa P25) como soporte. Se disolvieron cantidades calculadas de nitrato de cobalto hexahidratado ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Merck, 99.9%) en agua desionizada para obtener cargas nominales de cobalto del 1% y 10% en peso. La suspensión se agitó magnéticamente a temperatura ambiente durante 2 h. Posteriormente, el material se secó a 110°C durante 12 h y se calcinó a 900°C en atmósfera de aire (flujo de 100 mL/min) durante 4 h, con una rampa de calentamiento de 5°C/min . Los catalizadores resultantes se denominaron 1%Co/ TiO_2 y 10%Co/ TiO_2 . Una muestra de TiO_2 sin modificar se trató en las mismas condiciones para su uso como referencia.

2.2. Caracterización de materiales

La morfología y distribución de nanopartículas se analizaron mediante microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HR-TEM) en un equipo JEOL JEM-ARM200CF. La composición química superficial y los estados de oxidación se determinaron por espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) en un espectrómetro Thermo Scientific K-Alpha, utilizando radiación $\text{Al K}\alpha$. Las propiedades ópticas se estudiaron por espectroscopía de reflectancia difusa UV-Vis en un espectrofotómetro Shimadzu UV-2600, utilizando esfera integradora y BaSO_4 como referencia.

2.3. Evaluación de la actividad fotocatalítica

Las reacciones de fotorreducción de CO_2 se llevaron a cabo en un reactor tipo batch de 1 L de capacidad, equipado con una ventana de cuarzo. En cada ensayo, se suspendieron 0.5 g de fotocatalizador en 250 mL de agua desionizada (donante de electrones). La suspensión se purgó con un flujo constante de CO_2 (99.98%, 50 mL/min) durante 30 min para eliminar el aire disuelto y saturar el medio. La irradiación se realizó utilizando diferentes fuentes: una lámpara UV de 254 nm y lámpara de luz visible de 60 W.

La intensidad de la irradiación se midió con un radiómetro. Los experimentos se realizaron por duplicado a 25 ± 2 °C durante 1 h.

2.4. Análisis de productos y cálculos

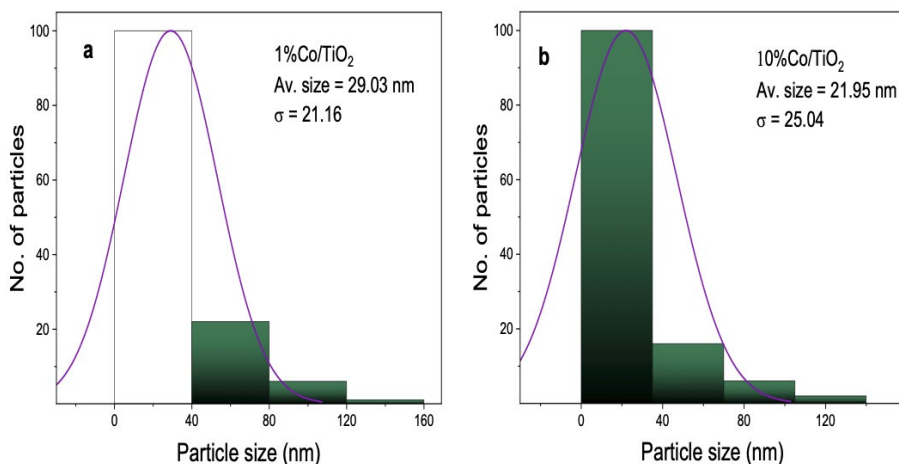
Los productos gaseosos y volátiles se analizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en un equipo Bruker Vertex 70, acoplado a una celda de gas. La cuantificación se realizó utilizando una curva de calibración previamente establecida para cada compuesto de interés.

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización de los fotocatalizadores

El análisis por HR-TEM confirmó la presencia de nanopartículas esféricas de Co bien dispersas sobre la superficie del TiO₂. La distribución de tamaño de partícula fue más homogénea y con un diámetro promedio menor (≈ 21 nm) (Figura 1a) para el catalizador con 1% de Co en comparación con el de 10% de Co (≈ 29 nm) (Figura 1b), lo que sugiere una menor aglomeración a menor carga metálica.

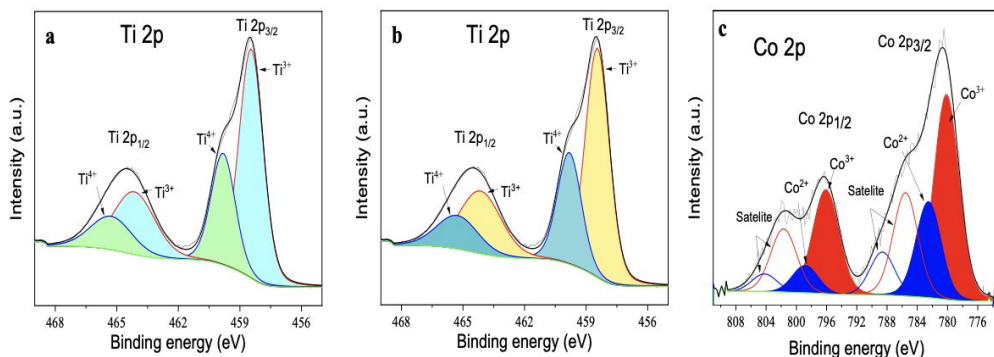
Figura 1. Tamaño de partícula y distribución de tamaños en la superficie de TiO₂. a) 1%Co/TiO₂, 10%Co/TiO₂



Los espectros XPS de la región Ti 2p para el TiO₂ (Figura 2a) de referencia mostraron los picos característicos de Ti⁴⁺ a 458.3 eV (Ti 2p_{3/2}) y 464.0 eV (Ti 2p_{1/2}). En los catalizadores modificados con Co, se observaron componentes adicionales a 459.8 eV y 465.4 eV, asignables a especies de Ti³⁺ (Figura 2b) (Bharti et al., 2016), lo que indica que la incorporación de cobalto induce la formación de defectos de oxígeno y la reducción parcial de Ti⁴⁺. En la región Co 2p, los espectros mostraron

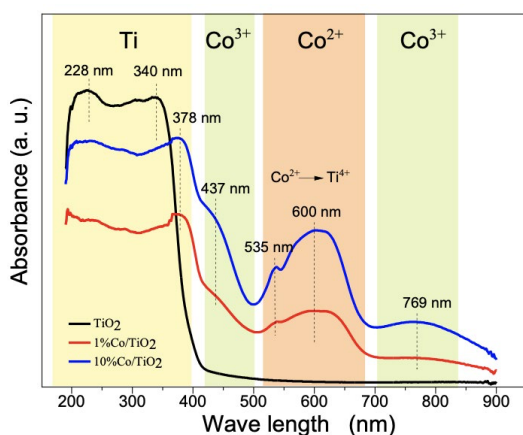
dobletes de spin-órbita con picos a ≈ 780.0 eV (Co 2p_{1/2}) y ≈ 795.5 eV (Co 2p_{3/2}), junto con satélites característicos (Figura 2c). La deconvolución reveló la coexistencia de especies de Co²⁺ y Co³⁺, con una relación cercana a 1:2, consistente con la estructura de Co₃O₄ espinela [(Co²⁺)(Co³⁺)₂O₄] (Li et al., 2018). La relación atómica Co/Ti calculada a partir de XPS fue de 0.27 para el catalizador al 1%Co, confirmando una buena dispersión superficial.

Figura 2. Espectros de alta resolución XPS. a) TiO₂ prístina, b) Ti dopada con Co, c) 1%Co/TiO₂



Los espectros UV-Vis (Figura 3) mostraron que la adición de Co induce un desplazamiento al rojo (red-shift) del borde de absorción del TiO₂. La energía de band-gap (Eg), calculada por el método de Tauc, disminuyó de 2.98 eV para el TiO₂ puro a 2.72 eV y 2.61 eV para los catalizadores con 1% y 10% de Co, respectivamente. Además, se observaron bandas de absorción adicionales en la región visible (400-800 nm), atribuidas a transiciones de carga de los iones Co²⁺ (en coordinación tetraédrica) y Co²⁺ (en coordinación octaédrica) (Chen et al., 2013). Esto confirma la capacidad de los materiales para ser activados con luz visible.

Figura 3. Espectros UV-Vis de los fotocatalizadores

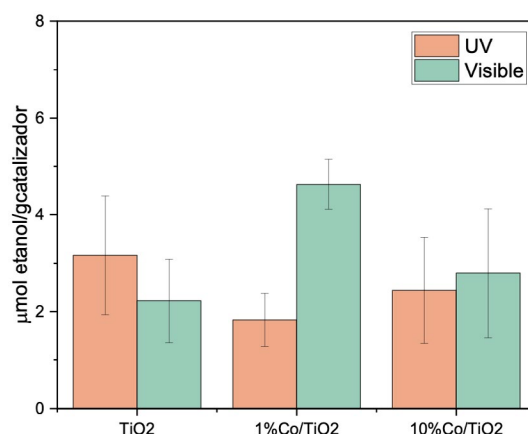


3.2. Actividad fotocatalítica y optimización

Los resultados de la fotorreducción de CO₂ confirmaron la formación de diversos productos, en pequeñas cantidades (CO, H₂O₂, formaldehído y acetaldehído), siendo el principal el etanol (C₂H₅OH).

En la Figura 4 se puede observar que bajo irradiación UV, los catalizadores Co/TiO₂ mostraron una actividad significativamente mayor que el TiO₂ puro para la producción de etanol. El catalizador 1 % Co/TiO₂ fue el más activo para la formación de etanol bajo radiación visible. Bajo esta irradiación visible (lámpara de 60 W, 328 W/m²), la superioridad de los catalizadores modificados fue más marcada respecto a TiO₂ puro, siendo el fotocatalizador de 1%Co/TiO₂ el que mostró la mayor actividad global, con producciones de 4.63 μmol/gcat·h. Esta mejora bajo luz visible está directamente correlacionada con la extensión de la absorción óptica y la mejor separación de cargas demostrada en las caracterizaciones.

Figura 4. Producción de etanol en los diferentes fotocatalizadores y bajo diferentes fuentes de irradiación



3.3. Mecanismo de reacción propuesto

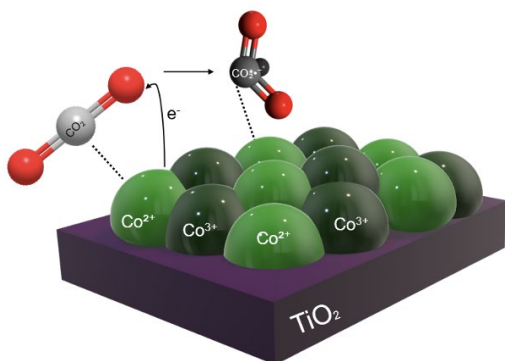
Con base en los productos detectados y la caracterización superficial, se propone un mecanismo de reacción. La presencia de Ti³⁺, Co²⁺ y Co³⁺ mejora la adsorción y activación de CO₂ a través de la interacción con sus orbitales d. El CO₂ adsorbido se reduce sucesivamente a CO (etapa limitante) y luego a radical formilo (•CHO), un intermediario clave. Se postula que la producción de etanol se debe a la eficiente dimerización de intermediarios C1 y C2 en la superficie del catalizador. Específicamente:

1.El radical •CHO puede hidrogenarse para formar HCHO o combinarse con otro •CHO para iniciar cadenas carbonadas.

2.El acetaldehído (CH₃CHO), formado a partir de •CHO y •CH₃, puede ser el precursor del etanol por hidrogenación.

Paso 1. Adsorción y activación de CO₂

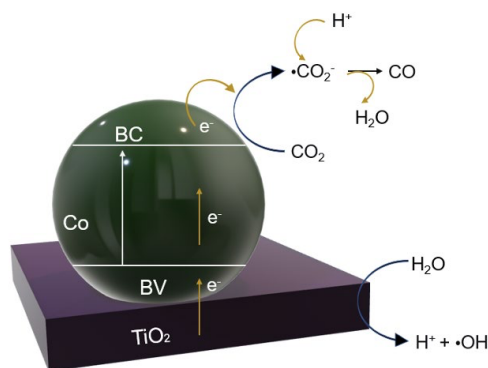
La reacción comienza con la adsorción y activación del CO₂ en los sitios metálicos de la superficie, facilitadas por la presencia de Ti³⁺, Co²⁺ y Co³⁺. Siguiendo la siguiente reacción: CO₂ + (Ti³⁺/Co²⁺/Co³⁺) → •CO₂-(adsorbido). A través del siguiente mecanismo: el CO₂ se adsorbe en los sitios de coordinación de los cationes superficiales (Ti³⁺ o Co²⁺). La transferencia de densidad electrónica desde los orbitales d del metal (especialmente de Co²⁺, un centro reductor fuerte) hacia el orbital π* antienlazante de la molécula de CO₂ conduce a su activación, formando un complejo de tipo carbonato (•CO₂⁻) y debilitando los enlaces C=O. Ti³⁺

Figura 5. Adsorción y activación de la molécula de CO₂

Paso 2: reducción a monóxido de carbono (CO)

El CO₂ activado sufre la primera reducción formal, considerada a menudo la etapa limitante de la velocidad. A partir de los electrones (e⁻) fotogenerados en la banda de conducción (BC) del TiO₂, son transferidos a través de los sitios Ti³⁺ y atrapados por los iones Co³⁺ (formando Co²⁺ temporalmente), que actúan como centros de transferencia de electrones hacia CO₂ adsorbido. Los huecos (h⁺) oxidan H₂O para promover la producción de protones (H⁺).

Figura 5. Formación de CO



Paso 3: Hidrogenación del CO a radical formilo (•CHO)

A partir de esta etapa comienza la formación de productos C₂⁺, donde la adsorción del CO se ve favorecida en los sitios de Co²⁺/Co³⁺. La transferencia simultánea de electrones provenientes de los centros Ti³⁺/Co y protones conduce a

la formación del radical formilo (•CHO). Las capacidades de los sitios de Co para adsorber CO y estabilizar este intermedio radical son vitales para dirigir la selectividad hacia la formación de etanol.

Paso 4: Formación de formaldehído (HCHO)

El radical formilo sigue la siguiente ruta: •CHO + e⁻ + H⁺ → HCHO.

Paso 5: Reducción a radical metilo (•CH₃)

El formaldehído sufre una reducción para formar el radical metilo: HCHO + 2e⁻ + 2H⁺ → •CH₃ + H₂O. Esta reducción es posible debido a los múltiples electrones y protones en la interfaz TiO₂/Co, donde los sitios Ti³⁺, Co²⁺ proveen electrones y los sitios Co³⁺ adyacentes facilitan el rompimiento de la molécula de agua.

Paso 6: acoplamiento C-C para formar acetaldehído (CH₃CHO)

En esta etapa se forman los enlaces C-C. El radical metilo reacciona con el radical formilo •CH₃ + •CHO → CH₃CHO. La proximidad de los intermediarios radicales adsorbidos en la superficie con un alto contenido en sitios de Ti y Co favorece este acoplamiento.

Paso 7: hidrogenación final a etanol (C₂H₅OH)

El acetaldehído sufre una hidrogenación final para producir etanol mediante la siguiente reacción: CH₃CHO + 2e⁻ + 2H⁺ → C₂H₅OH.

3.4 Resumen sinérgico entre las especies químicas de los fotocatalizadores

- Ti³⁺ actúa principalmente como un donante de electrones y un centro reductor fuerte. Facilita la transferencia de electrones desde el bulk de TiO₂ hacia la interfaz y promueve la formación de los iones Co²⁺, cruciales para la adsorción del CO₂.

- Co²⁺ es el sitio principal de adsorción para el CO₂ y el CO. Estabiliza los intermediarios clave como el radical •CHO y facilita las etapas de hidrogenación.

- Co³⁺ actúa como un capturador y transportador de huecos y centro de transferencia de electrones. Ayuda a separar las cargas eficientemente oxidando H₂O para generar H⁺. Altera su estado de oxidación con Co²⁺ (Co³⁺ + e⁻ = Co²⁺), mediando la transferencia de electrones a los adsorbatos.

Esta sinergia entre Co/TiO₂ crea un ciclo catalítico eficiente donde la separación de cargas, la adsorción de CO₂ y H₂O y la estabilización de intermediarios se optimizan de manera concertada, conduciendo a la selectividad observada hacia el etanol.

Conclusiones

Se demostró exitosamente que los fotocatalizadores Co/TiO₂ son altamente efectivos para la producción selectiva de etanol, a partir de la fotorreducción de CO₂ con H₂O. La actividad superior bajo luz visible se atribuye a la formación de una heterounión que reduce el band-gap, mejora la absorción de luz y, crucialmente, suprime la recombinación de portadores de carga debido a la presencia de especies Ti³⁺, Co²⁺ y Co³⁺. Este trabajo subraya la viabilidad de dirigir la selectividad hacia productos de valor añadido mediante la ingeniería de sitios activos en la superficie del fotocatalizador.

Referencias

- Akhundi, A., Habibi-Yangjeh, A., Abitorabi, M., & Rahim Pouran, S. (2019). Review on photocatalytic conversion of carbon dioxide to value-added compounds and renewable fuels by graphitic carbon nitride-based photocatalysts. *Catalysis Reviews*, 61(4), 595-628. <https://doi.org/10.1080/01614940.2019.1654224>
- Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., Aoki, K., & Taga, Y. (2001). Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. *Science*, 293(5528), 269-271. <https://doi.org/10.1126/science.1061051>
- Bard, A. J., & Fox, M. A. (1995). Artificial Photosynthesis: Solar Splitting of Water to Hydrogen and Oxygen. *Accounts of Chemical Research*, 28(3), 141-145. <https://doi.org/10.1021/ar00051a007>
- Bharti, B., Kumar, S., Lee, H.-N., & Kumar, R. (2016). Formation of oxygen vacancies and Ti³⁺ state in TiO₂ thin film and enhanced optical properties by air plasma treatment. *Scientific Reports*, 6(1), 32355. <https://doi.org/10.1038/srep32355>
- Chen, Q., Ji, F., Liu, T., Yan, P., Guan, W., & Xu, X. (2013). Synergistic effect of bifunctional Co-TiO₂ catalyst on degradation of Rhodamine B: Fenton-photo hybrid process. *Chemical Engineering Journal*, 229, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.024>
- Ghadikolaei, M. A., Wong, P. K., Cheung, C. S., Ning, Z., Yung, K.-F., Zhao, J., Gali, N. K., & Berenjestanaki, A. V. (2021). Impact of lower and higher alcohols on the physicochemical properties of particulate matter from diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110970. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110970>
- Ji, Y., & Luo, Y. (2016). Theoretical Study on the Mechanism of Photoreduction of CO₂ to CH₄ on the Anatase TiO₂ (101) Surface. *ACS Catalysis*, 6(3), 2018-2025. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b02694>
- Kumar, S. G., & Devi, L. G. (2011). Review on Modified TiO₂ Photocatalysis under UV/Visible Light: Selected Results and Related Mechanisms on Interfacial Charge Carrier Transfer Dynamics. *The Journal of Physical Chemistry A*, 115(46), 13211-13241. <https://doi.org/10.1021/jp204364a>
- Li, J., Li, Z., Ning, F., Zhou, L., Zhang, R., Shao, M., & Wei, M. (2018). Ultrathin Mesoporous Co₃O₄ Nanosheet Arrays for High-Performance Lithium-Ion Batteries. *ACS Omega*, 3(2), 1675-1683. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01832>
- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(3), 169-189. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.06.001>
- Ola, O., & Maroto-Valer, M. M. (2015). Transition metal oxide based TiO₂ nanoparticles for visible light induced CO₂ photoreduction. *Applied Catalysis A: General*, 502, 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.06.007>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M. M. B., Poloczanska, E. S., Minterbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., & Rama, B. (Eds.). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Rani, B., Nayak, A. K., & Sahu, N. K. (2022). Fundamentals principle of photocatalysis. En *Nanostructured Materials for Visible Light Photocatalysis* (pp. 1-22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823018-3.00009-9>
- Tahir, M., & Amin, N. S. (2013). Photocatalytic CO₂ reduction with H₂O vapors using montmorillonite/TiO₂ supported microchannel monolith photoreactor. *Chemical Engineering Journal*, 230, 314-327. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.055>
- Wang, W., Li, T., Komarneni, S., Lu, X., & Liu, B. (2022). Recent advances in Co-based co-catalysts for efficient photocatalytic hydrogen generation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 608, 1553-1575. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.10.051>

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 30 de octubre de 2025.

Uso de la zeolita natural para el ablandamiento del agua potable en el municipio del Carmen

Gutiérrez Laffon Yazmín Michelle⁽¹⁾

Abatal Mohamed⁽¹⁾

Anguebes Franseschi Francisco⁽²⁾

De la Cruz Hernández Rocío⁽³⁾

Aguilar Ucán Claudia Alejandra⁽²⁾

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como propósito evaluar el uso de la zeolita natural tipo clinoptilolita como material alternativo para eliminar la dureza del agua potable en el Municipio del Carmen, una región donde este problema afecta significativamente a los hogares. La investigación buscó contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles, económicas y ambientalmente amigables que mejoren la calidad del agua y reduzcan el impacto asociado al uso de productos químicos tradicionales. Para ello, se recolectaron muestras de agua de diferentes puntos del municipio y se determinó su dureza total mediante titulación con EDTA. La zeolita natural se caracterizó mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Asimismo, se realizaron pruebas de adsorción en las que se variaron parámetros como el pH, el tamaño de partícula, el tiempo de contacto y la temperatura. Los resultados mostraron que la zeolita natural alcanzó un porcentaje de remoción de aproximadamente 22 % al emplear una muestra de agua natural bajo condiciones óptimas. Estos hallazgos confirman el potencial de la zeolita como una alternativa viable y sustentable frente a los métodos convencionales

de ablandamiento, con posibilidades de aplicación en filtros domésticos y sistemas rurales, lo que contribuiría a mejorar la calidad del agua y a promover el cuidado ambiental.

Palabras claves

Dureza, Zeolita Clinoptilolita e Intercambio iónico.

Abstract

This study evaluated the use of natural clinoptilolite zeolite as an alternative material for removing hardness from drinking water in Carmen, a municipality where this problem significantly affects households. The study aims to contribute to the development of sustainable, economical, and environmentally friendly solutions for improving water quality and mitigating the environmental impact associated with the use of traditional chemicals. Water samples were collected from various locations within the municipality and analyzed using EDTA titration to determine their total hardness. We characterized the natural zeolite using X-ray diffraction (XRD) and Fourier

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Carmen, Campus III, Av. Mundo Maya, C.P. 24153, Ciudad del Carmen, Campeche, México.

⁽²⁾ Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56, No. 4 Av. Concordia, Ciudad del Carmen, Campeche, 24180 México. ⁽³⁾ C. Ejido S/N, Col. Siglo XXI, Centro, 86751 Frontera, Tabasco, México México.

transform infrared spectroscopy (FTIR). Adsorption tests were conducted by varying parameters such as pH, particle size, contact time, and temperature. The results showed that under optimal conditions using a natural water sample, the natural zeolite achieved a removal efficiency of approximately 22%. These results confirm zeolite's potential as a sustainable alternative to conventional water softening methods. Using zeolite in domestic filters and rural systems could improve water quality and promote environmental conservation.

Keywords

Drinking water, Hardness, Clinoptilolite zeolite, Ion exchange.

Introducción

La dureza del agua es uno de los problemas más comunes y relevantes que afectan la calidad del recurso hídrico. Esta condición es causada principalmente por altas concentraciones de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). Aunque no representa un riesgo directo para la salud humana, la presencia de estos iones genera diversos inconvenientes domésticos e industriales, entre los que destacan la formación de incrustaciones o sarro en tuberías, calentadores, lavadoras y utensilios, así como la disminución de la eficacia de detergentes y jabones (World Health Organization, 2022). A largo plazo, estos efectos incrementan los costos de mantenimiento, reducen la vida útil de los equipos que operan con agua dura y contribuyen a un mayor consumo energético.

La principal fuente de dureza del agua es la disolución de minerales presentes en el suelo y las rocas por las cuales fluye el recurso. Entre los minerales más comunes responsables de la dureza se encuentran la calcita (CaCO_3), la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Durante su recorrido subterráneo o superficial, el agua actúa como un solvente natural, disolviendo estos minerales e incorporando los iones que generan la dureza.

En el Municipio del Carmen, la problemática de la dureza del agua es evidente en diversas

comunidades, cuyas fuentes de abastecimiento presentan concentraciones elevadas de este parámetro. Si bien en algunos casos los valores se mantienen dentro del límite máximo permisible establecido por la norma mexicana (500 mg/L de CaCO_3), es importante destacar que, según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), concentraciones superiores a 180 mg/L de CaCO_3 ya se clasifican como “agua muy dura”, nivel en el que suelen observarse problemas de incrustaciones en tuberías. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un valor máximo de 200 mg/L de CaCO_3 . A pesar de estas recomendaciones, en el municipio no se brinda la atención necesaria a esta situación, ya que el agua suministrada no pasa por un proceso de ablandamiento en las plantas potabilizadoras. Esta condición repercute directamente en la economía de los hogares y en la calidad de vida de la población, que debe enfrentar los efectos del sarro y la pérdida de eficiencia en los sistemas domésticos.

En la actualidad, existen diversos métodos para reducir la dureza del agua, entre los que destacan los procesos químicos, físicos, de adsorción e intercambio iónico. Entre las técnicas más comunes se incluyen el método cal-soda, el uso de resinas sintéticas y las tecnologías de membranas, como la ósmosis inversa y la nanofiltración, procedimientos ampliamente utilizados en el sector industrial (Al Aani et al., 2020; Biesheuvel et al., 2022; Mahmoud & Mostafa, 2023; Tang et al., 2021). Si bien estos métodos son eficaces para eliminar iones de calcio y magnesio, generalmente implican altos costos operativos, un consumo energético considerable y, en algunos casos, la generación de residuos secundarios que pueden afectar negativamente al medio ambiente.

En este contexto, los materiales naturales han cobrado creciente interés como alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas. Entre ellos, se encuentran el bagazo de caña de azúcar, la cáscara de café, las semillas de *Moringa oleífera*, la fibra de coco, las arcillas y las zeolitas naturales (Ayaliew Werkneh, 2015; Balasuriya et al., 2021; Muniz et al., 2020; Wickramasuriya et al., 2021). Las zeolitas, en particular, son

materiales microporosos que destacan por su alta capacidad de intercambio iónico y su amplia disponibilidad en diversas regiones del país. Diversos estudios han demostrado que las zeolitas, tanto en su forma natural como modificada, pueden reducir significativamente la dureza del agua al sustituir los iones de calcio y magnesio por otros cationes, como el sodio o el potasio. Además, su bajo costo, facilidad de regeneración y origen mineral las convierten en una opción prometedora frente a los métodos convencionales de ablandamiento (Krstić, 2021).

Con base en las propiedades reconocidas de las zeolitas, este trabajo se orientó a evaluar el uso de zeolita natural tipo clinoptilolita como material alternativo para reducir la dureza del agua potable en el Municipio del Carmen. El estudio busca determinar la eficiencia de remoción de iones de calcio y magnesio mediante intercambio iónico. El alcance de la investigación incluye la caracterización de la zeolita natural mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), con el fin de comprender su comportamiento superficial. Asimismo, se establecieron condiciones experimentales controladas para evaluar variables como el pH, el tamaño de partícula, el tiempo de contacto y la temperatura, con el objetivo de identificar los parámetros óptimos de operación.

Las metas de este estudio se centran en proponer un método eficiente, económico y ambientalmente sustentable para el ablandamiento del agua, con potencial de aplicación en filtros domésticos o sistemas rurales de tratamiento. La estrategia de investigación se basó en un enfoque experimental dividido en etapas: recolección de muestras de aguas naturales, acondicionamiento de las zeolitas, caracterización del material y pruebas de intercambio iónico. El área de estudio corresponde al Municipio del Carmen, localizado en la región suroeste del estado de Campeche, donde la geología del subsuelo favorece la presencia de aguas con alta dureza; además, se consideraron otras regiones cercanas como Frontera,

Champotón, Hecelchakán y Mérida. Desde el punto de vista científico y tecnológico, esta investigación aporta conocimiento sobre la optimización del comportamiento de las zeolitas naturales mediante tratamientos con sales alcalinas, y contribuye a la búsqueda de soluciones sostenibles adaptadas a las condiciones locales, aprovechando materiales disponibles naturalmente, promoviendo el uso de tecnologías limpias y de bajo impacto ambiental, orientadas al beneficio de las comunidades del Municipio del Carmen.

Métodos

Recolección de muestras de aguas naturales

En la primera etapa, se llevó a cabo la recolección de muestras de agua natural en diferentes puntos del Municipio del Carmen (Chicbul, Checubul, Sabancuy, Isla aguada y Carmen), así como en regiones cercanas (Frontera, Champotón, Hecelchakán y Mérida) con el propósito de obtener un panorama representativo de la dureza en la zona. La dureza total se determinó mediante el método volumétrico de titulación con EDTA (HACH, 5M), expresando los resultados en miligramos por litro (mg/L) de CaCO_3 , considerando el factor de conversión (1 gota = 17.1 mg/L de CaCO_3) (Hach Company, 2015).

Figura 1. Sitios de recolección de las muestras de agua del municipio del Carmen y zonas cercanas.



La zeolita natural tipo clinoptilolita se lavó con agua desionizada para eliminar impurezas superficiales. Posteriormente, se secó a 250 °C y se tamizó con una malla N° 10.

Caracterización de la zeolita natural

Se caracterizó la zeolita natural mediante difracción de rayos X (DRX) para identificar su fase cristalina y mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para analizar los grupos funcionales presentes en su superficie.

Pruebas de intercambio iónico

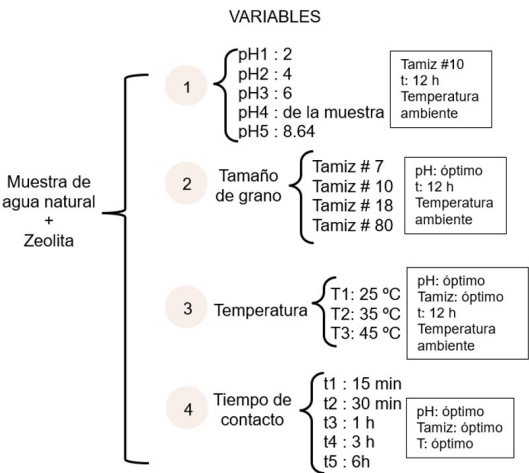
Se calculó el porcentaje de intercambio (*AD*) mediante la siguiente ecuación:

$$AD\% = \left(1 - \frac{c_e}{c_0}\right) \cdot 100$$

Donde *c*₀ y *c*_e corresponden a las concentraciones iniciales y finales de iones (mg/L), respectivamente (Campanile et al., 2022).

Se emplearon muestras de agua natural con alto contenido de dureza, manteniendo la misma dosis de 100 g/L, tal como se ilustra en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología del tratamiento de la muestra recolectada.



Resultados y discusión

Determinación de dureza en las muestras de aguas naturales

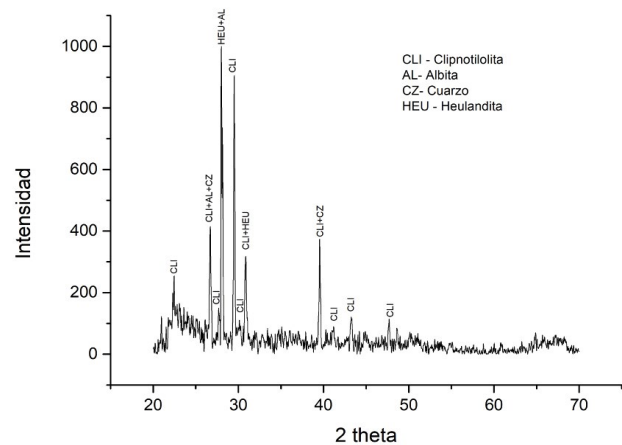
Los valores de dureza total, determinados en las diferentes localidades y expresados en miligramos por litro (mg/L) de CaCO₃, revela que todas las muestras superan el límite de 200 mg/L establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para clasificar un agua como dura. Las concentraciones más elevadas se registraron en Checubul (1385.1 mg/L) y Chicbul (1333.8 mg/L), seguidas de Champotón (803.7 mg/L) y Hecelchakán (701.1 mg/L). Por el contrario, las localidades de Frontera (290.7 mg/L), Isla Aguada (307.8 mg/L), Sabancuy (324.9 mg/L), Mérida (427.5 mg/L) y Carmen (410.4 mg/L) mostraron los valores más bajos, aunque todos ellos se clasifican aún como aguas muy duras según los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Caracterización del material

El análisis por difracción de rayos X (DRX) permitió identificar las principales fases cristalinas de la zeolita natural tipo clinoptilolita, cuyos resultados se presentan en la Figura 3. En el difractograma se observan picos bien definidos correspondientes a clinoptilolita (CLI), albita (AL), cuarzo (CZ) y heulandita (HEU). La clinoptilolita resultó ser la fase predominante, lo que evidencia una estructura ordenada y de alta cristalinidad. Por su parte, la presencia de albita y cuarzo se atribuye a impurezas minerales naturales presentes en el yacimiento (Mansouri et al., 2013; Stocker et al., 2017).

La detección de heulandita sugiere la posible coexistencia de fases zeolíticas estructuralmente afines, un fenómeno común en materiales naturales debido a su origen geológico. En conjunto, los resultados confirman que la zeolita analizada es una clinoptilolita de origen natural con una estructura cristalina estable.

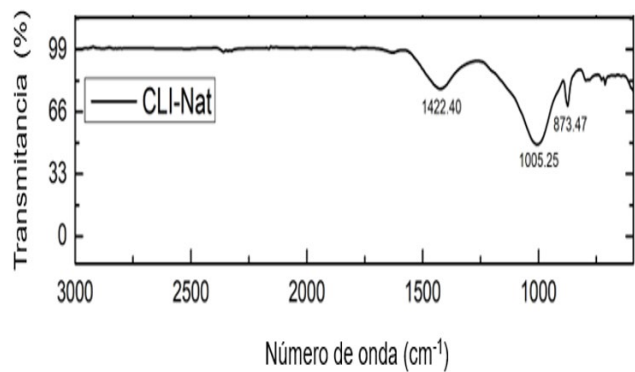
Figura 3. Patrones de DRX correspondiente a la zeolita natural tipo Clinoptilolita.



El espectro infrarrojo (IR) de la zeolita natural tipo clinoptilolita se llevó a cabo para caracterizar su estructura molecular y los grupos funcionales presentes (Figura 4). En el espectro FTIR de la muestra CLI-Nat se identifican bandas características de la

clinoptilolita, entre las cuales destacan una señal alrededor de 1000 cm^{-1} , asociada al estiramiento asimétrico de los enlaces Si-O y Al-O, y otra próxima a 870 cm^{-1} , atribuida a vibraciones de tensión de estos mismos enlaces (Mamba, 2010).

Figura 4. Espectro FTIR de la zeolita tipo Clinoptilolita natural.



Asimismo, la banda ubicada alrededor de 1400 cm^{-1} en la muestra puede asociarse con vibraciones del esqueleto de la red cristalina (Si-O-Si y Al-O-Si), así como con interacciones entre los átomos de oxígeno del marco estructural y cationes compensadores como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} o K^{+} localizados en las cavidades de la red, de acuerdo con lo reportado en la literatura (Kukobat et al., 2022).

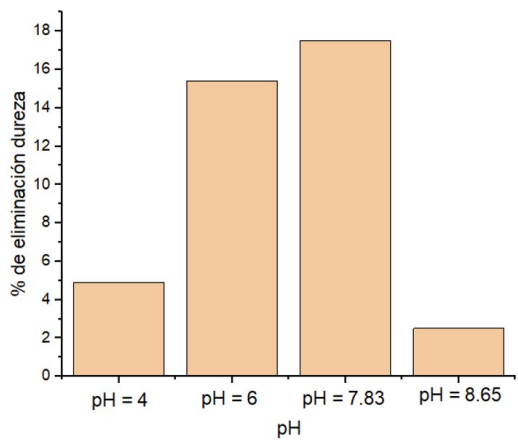
Pruebas de intercambio iónico

Efecto del pH de la solución en la reducción de la dureza

En la Figura 5 se presenta el porcentaje de remoción de dureza obtenido al variar el pH de la solución. Los resultados muestran que el comportamiento del intercambio iónico está directamente influenciado por las condiciones de acidez o basicidad del medio.

Figura 5. Porcentaje de remoción de dureza en función del pH para las zeolitas Clinoptilolita natural

NOTA: Durante los ensayos a pH 2, se obtuvieron valores negativos en el porcentaje de remoción de dureza, a causa de que las concentraciones finales de dureza eran mayores que las iniciales.



Se observa que la zeolita natural alcanzó los mayores porcentajes de remoción en todo el rango de pH evaluado, con un máximo de eficiencia alrededor de pH 7.8. Este valor, al encontrarse ligeramente por encima del punto de carga cero de la CLI-Nat (pHPZC= 7.5), implica que la superficie de la zeolita adquiere carga negativa, lo que favorece la atracción e intercambio de los cationes de dureza (Ca^{2+} y Mg^{2+}).

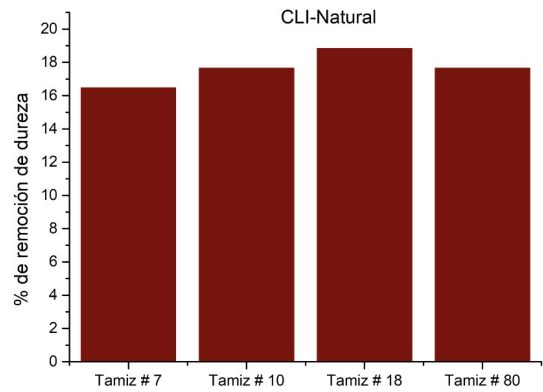
La eficiencia disminuye cuando el pH se aleja de este valor óptimo debido a diversos factores. A pH elevados, la presencia de iones OH^- favorece la precipitación de carbonatos e hidróxidos de calcio y magnesio, lo que reduce la concentración de cationes disponibles para el intercambio. Además, estos precipitados pueden obstruir los poros de la zeolita y, en condiciones (Krstić, 2021). Por otra parte, en medios altamente ácidos, la elevada concentración de protones (H^+) compite con los cationes responsables de la dureza por los sitios de intercambio de la zeolita, lo que reduce la eficiencia del proceso (Krstić, 2021). En estas condiciones, se registraron incluso valores negativos de eliminación, lo que indica una liberación neta de Ca^{2+} y Mg^{2+} desde la estructura de la zeolita hacia la solución. En conjunto, los resultados confirman que el pH cercano a la neutralidad es el más favorable

para el ablandamiento del agua mediante zeolitas, tanto naturales como modificadas.

Efecto del tamaño de partícula en la reducción de la dureza

La Figura 6 muestra los porcentajes de eliminación de dureza en función del tamaño de partícula, utilizando fracciones obtenidas por tamizado. Para la zeolita natural, se observaron variaciones moderadas en la eficiencia, con un ligero incremento en las fracciones de tamaño intermedio.

Figura 6. Porcentaje de remoción de dureza en función del tamaño de partícula de la zeolita Clinoptilolita: natural (CLI-Natural), sódica (CLI-Na5M) y potásica (CLI-K2.5).



Estos resultados indican que las fracciones intermedias del material ofrecen el mejor desempeño, al mantener un balance entre superficie accesible y facilidad de difusión de los iones. De este modo, se confirma que no siempre las partículas más pequeñas garantizan una mayor eficiencia en los procesos de intercambio iónico, sino que es necesario considerar el tamaño de partícula como un parámetro clave de optimización en el diseño de sistemas de ablandamiento basados en zeolitas.

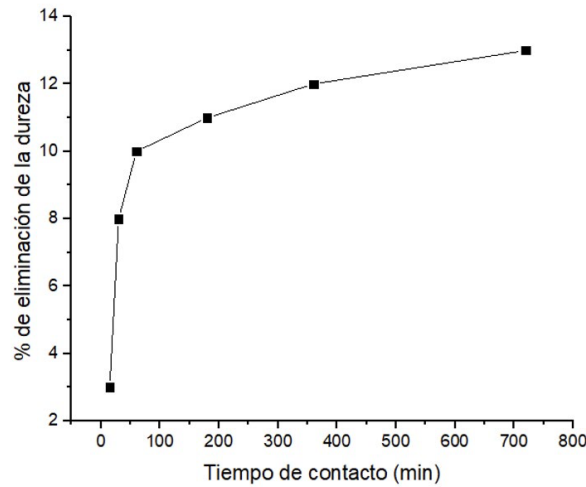
Efecto del tiempo de contacto en la reducción de la dureza

La Figura 7 muestra los porcentajes de eliminación de dureza en función del tiempo de contacto. Se observa que la mayor parte del intercambio iónico tiene lugar durante

las primeras horas de contacto, ya que los iones de calcio y magnesio se intercambian rápidamente en los sitios más accesibles de la superficie de la zeolita. Posteriormente, a medida que estos sitios superficiales se van saturando, la cinética del proceso se ralentiza, ya que la difusión de los iones hacia el

interior de la estructura cristalina se ve más limitada. Este comportamiento confirma que prolongar el tiempo de contacto no incrementa necesariamente la eficiencia de eliminación, ya que una vez que se alcanza el equilibrio entre la fase sólida y la solución, la velocidad de intercambio se reduce significativamente.

Figura 7. Porcentaje de remoción de dureza en función del tiempo de contacto para la zeolita CLI-Natural

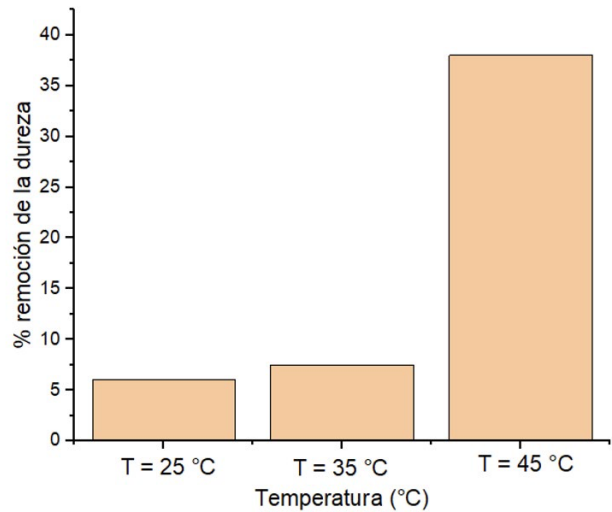


Efecto de la temperatura en la reducción de la dureza

La figura 8 muestra la variación del porcentaje de eliminación de dureza en función de la temperatura de contacto (25 °C, 35°C y 45 °C)

para la zeolita CLI-Natural. Los resultados muestran que el incremento de la temperatura favorece el proceso de intercambio iónico, lo que sugiere que las condiciones térmicas tienen una influencia positiva en la eficiencia de eliminación.

Figura 8. Porcentaje de remoción de dureza en función de la temperatura del intercambio iónico para la zeolita CLI-Natural.



Se observó un incremento en la eficiencia de eliminación al aumentar la temperatura, alcanzándose el valor óptimo a 45 °C con una eliminación del 21,25 %. Este comportamiento puede deberse a que el aumento de la temperatura favorece la difusión de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} hacia los sitios de intercambio de la zeolita al incrementar su energía cinética y facilitar su movilidad a través de los poros de la materia (Krstić, 2021). Así, las temperaturas moderadamente altas aceleran la cinética del intercambio iónico y mejoran el rendimiento global del proceso.

En conjunto, estos resultados demuestran que la temperatura es un factor determinante en la eficiencia del intercambio iónico, ya que aumenta la movilidad y la accesibilidad de los iones a los sitios de intercambio. Desde el punto de vista operativo, un aumento controlado de la temperatura podría optimizar el rendimiento de los sistemas de ablandamiento de agua basados en zeolitas.

Conclusiones

En este estudio se evaluó el potencial de la zeolita tipo clinoptilolita como material alternativo para ablandar el agua en el municipio de Carmen y otras localidades con condiciones similares. Se determinó que parámetros como el pH, el tamaño de las partículas, el tiempo de contacto y la temperatura influyen significativamente en la eficiencia del proceso. Las condiciones óptimas se establecieron cerca de la neutralidad ($\text{pH} \approx 7,8$), con un tamaño de partícula intermedio y una temperatura de 45 °C. Con esta configuración, se alcanzó una eficiencia de eliminación máxima del 22 %, lo que redujo la dureza a aproximadamente 700 mg/L de CaCO_3 . Aunque este valor aún supera los límites recomendados por la EPA, se estima que un mayor número de etapas de contacto entre el agua y la zeolita permitiría alcanzar niveles de dureza cercanos a 200 mg/L de CaCO_3 , cumpliendo así con los estándares internacionales.

Los resultados obtenidos confirman que la zeolita natural es una alternativa viable,

económica y respetuosa con el medio ambiente frente a los métodos convencionales de ablandamiento, debido a su bajo impacto ambiental y a lo fácil que resulta implementarla. Su posible aplicación en filtros domésticos o en sistemas de tratamiento rurales podría mejorar significativamente la calidad del agua y ofrecer una solución sostenible y adaptada a las condiciones locales del municipio y la región.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo institucional y el acceso a las instalaciones necesarias para la realización de esta investigación por parte de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR). Asimismo, se reconoce la financiación otorgada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) mediante una beca de posgrado, que hizo posible la realización de este trabajo.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés, ni intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en la elaboración, resultados o interpretación del presente artículo.

Referencias

- Al Aani, S., Mustafa, T. N., & Hilal, N. (2020). Ultrafiltration membranes for wastewater and water process engineering: A comprehensive statistical review over the past decade. *Journal of Water Process Engineering*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101241>
- Ayaliew Werkneh, A. (2015). Removal of Water Hardness Causing Constituents Using Alkali Modified Sugarcane Bagasse and Coffee Husk at Jigjiga City, Ethiopia: A Comparative Study. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(1), 7. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150301.12>
- Balasuriya, B. M. D. S., Bandara, S. R. W. M. I. S., Kottegoda, N., & Perera, A. D. L. C. (2021). Magnetite nanoparticles impregnated pyrolysed coconut coir for water softening applications. *Ceylon Journal of Science*, 50(5), 349. <https://doi.org/10.4038/cjs.v50i5.7924>
- Biesheuvel, P. M., Porada, S., Elimelech, M., & Dykstra,

- J. E. (2022). Tutorial review of reverse osmosis and electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 647. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120221>
- Campanile, A., Liguori, B., Ferone, C., Caputo, D., & Aprea, P. (2022). Zeolite-based monoliths for water softening by ion exchange/precipitation process. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07679-2>
- Hach Company. (2015, June). Kit para Teste de Dureza Modelo 5B. <https://www.hach.com/p-dropcount-titration-test-kits/145300>
- Krstić, V. (2021). Role of zeolite adsorbent in water treatment. In *Handbook of Nanomaterials for Wastewater Treatment: Fundamentals and Scale up Issues* (pp. 417–481). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821496-1.00024-6>
- Kukobat, R., Škrbić, R., Massiani, P., Baghdad, K., Launay, F., Sarno, M., Cirillo, C., Senatore, A., Salčin, E., & Atlagić, S. G. (2022). Thermal and structural stability of microporous natural clinoptilolite zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2022.112101>
- Mahmoud, A. E. D., & Mostafa, E. (2023). Nanofiltration Membranes for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions: Preparations and Applications. In *Membranes* (Vol. 13, Issue 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/membranes13090789>
- Mamba, B. & N. D. & M.-B. A. (2010). The effect of conditioning with NaCl, KCl and HCl on the performance of natural clinoptilolite's removal efficiency of Cu²⁺ and Co²⁺ from Co/Cu synthetic solutions. *Water SA*, 36(4). <http://www.wrc.org.za>
- Mansouri, N., Rikhtegar, N., Ahmad Panahi, H., Atabi, F., & Shahraki, B. K. (2013). Porosity, characterization and structural properties of natural zeolite - Clinoptilolite - As a sorbent. *Environment Protection Engineering*, 39(1), 139–152. <https://doi.org/10.5277/EPE130111>
- Muniz, G. L., Duarte, F. V., & Rakocevic, M. (2020). Assessment and optimization of carbonated hard water softening with moringa oleifera seeds. *Desalination and Water Treatment*, 173, 156–165. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24745>
- Stocker, K., Ellersdorfer, M., Lehner, M., & Raith, J. G. (2017). Characterization and Utilization of Natural Zeolites in Technical Applications. *BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte*, 162(4), 142–147. <https://doi.org/10.1007/s00501-017-0596-5>
- Tang, C., Rygaard, M., Rosshaug, P. S., Kristensen, J. B., & Albrechtsen, H. J. (2021). Evaluation and comparison of centralized drinking water softening technologies: Effects on water quality indicators. *Water Research*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117439>
- Wickramasuriya, A. I. R., Arachchige, R. C. W., & Kottegoda, I. R. M. (2021). Characterization and Modification of Clay for Removal of Drinking Water Hardness. *Material Science Research India*, 18(3), 318–331. <https://doi.org/10.13005/msri/180307>
- World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. <https://www.who.int/publications/item/9789240045064>

Fecha de recepción: 19 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 30 de octubre de 2025.

Degradación fotocatalítica de antiinflamatorios no esteroideos

Zermeño Resendiz Brenda Berenice^{(1)*}

Castro Alonso Juan Martín⁽¹⁾

González Pereyra Daniela⁽²⁾

Aguilar Ucán Claudia⁽³⁾

Moctezuma Edgar⁽¹⁾

RESUMEN

La contaminación acuática por productos farmacéuticos, clasificados como Contaminantes Emergentes (CEs), representa una amenaza global para la salud. Debido a su diseño para la bioactividad y estabilidad, estos compuestos, en particular los fármacos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs), son resistentes a los métodos de tratamiento de aguas residuales (PTAR) convencionales. Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), específicamente la fotocatálisis heterogénea, han demostrado ser una de las tecnologías para llevar a cabo la mineralización completa de estos contaminantes.

Este trabajo condensa investigaciones recientes sobre la degradación fotocatalítica de (AINEs) incluyendo diclofenaco (DCF), naproxeno (NPX), ketoprofeno (KTP). También analiza la eficacia de diversos catalizadores, comenzando con el dióxido de titanio (TiO₂), el óxido de zinc (ZnO), hasta materiales avanzados como el nitruro de carbono grafítico (g-C₃N₄), ferritas magnéticas y materiales de heterounión.

Las investigaciones concluyen que, si bien la degradación del compuesto original se lleva a cabo con la mayoría de los materiales, la eficiencia de mineralización (eliminación de Carbono Orgánico Total) y la toxicidad de los productos intermediarios son factores críticos que dependen del catalizador.

Palabras clave

Fotocatálisis, antiinflamatorio, no esteroideo, luz Uv.

Abstract

Water pollution caused by pharmaceutical products, classified as Emerging Contaminants (ECs), represents a global threat to both human and environmental health. Due to their inherent bioactivity and high chemical stability, these compounds particularly non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) exhibit strong resistance to conventional wastewater treatment plant (WWTP) processes. Advanced Oxidation Processes (AOPs), especially heterogeneous photocatalysis, have emerged as promising technologies capable of achieving the complete mineralization of these pollutants.

This review summarizes recent research on the photocatalytic degradation of NSAIDs, including diclofenac (DCF), naproxen (NPX), and ketoprofen (KTP). It further evaluates the performance and efficiency of various photocatalysts, from titanium dioxide (TiO₂) and zinc oxide (ZnO) to advanced materials such as graphitic carbon nitride (g-C₃N₄), magnetic ferrites, and heterojunction-based composites.

⁽¹⁾ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Manuel Nava #6 C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México. ⁽²⁾ Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN), Universidad Autónoma de México, Carr. Tijuana-Ensenada km107, C.I.C.E.S.E., 22860 Ensenada, B.C., México. ⁽³⁾ Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56 no. 4 colonia Benito C.P. 24158 Juarez, Cd, del Carmen Campeche, México.

Findings indicate that although the degradation of the parent compounds can be achieved with most photocatalytic materials, mineralization efficiency (Total Organic Carbon removal) and the toxicity of intermediate degradation products remain critical parameters that depend strongly on the catalyst's physicochemical properties and reaction conditions.

Keywords

Photocatalysis, anti-inflammatory, non-steroidal, UV light.

Introducción

El término "contaminantes emergentes" (CEs) se refiere a compuestos químicos, tanto sintéticos como naturales, que no son comúnmente monitoreados en el medio ambiente, pero tienen el potencial de causar efectos ecológicos o de salud adversos. Su presencia en el agua es un resultado directo de la actividad antropogénica, incluyendo la excreción humana y animal, la eliminación inadecuada de medicamentos y los efluentes industriales y hospitalarios.

Dentro de los CEs, los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs) son una categoría de especial preocupación. Los fármacos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) son importantes en este grupo. Compuestos como el Diclofenaco (DCF), Naproxeno (NPX), Ketoprofeno (KTP), se consumen en grandes cantidades anualmente a nivel mundial (Mohamed et al., 2023). Su diseño, orientado a la estabilidad metabólica, se traduce en una alta persistencia en el medio acuático.

Los sistemas convencionales de PTAR, basados principalmente en procesos biológicos (lodos activados), no están diseñados para eliminar estos microcontaminantes. Como resultado, los AINEs atraviesan las plantas de tratamiento y se descargan continuamente en ríos y lagos, donde pueden inducir efectos tóxicos en organismos no objetivo, como la feminización de peces o daños renales en la vida silvestre (Chakachaka et al., 2024).

Ante esta problemática, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) se han trabajado con un alto éxito para solucionar dicha problemática, estos procesos se definen como mecanismos que generan especies altamente oxidantes, principalmente el radical hidroxilo ($\text{HO}\cdot$), con un potencial de oxidación superior ($E^\circ = 2.8 \text{ eV}$) capaz de degradar compuestos orgánicos. Entre la variedad de POA (ozonización, Fenton, etc.), esta la fotocatálisis heterogénea que se basa en la activación de un material semiconductor

llamado catalizador, mediante irradiación de luz, generando especies altamente oxidantes que atacan y descomponen las moléculas del contaminante, hasta llegar a CO_2 , agua y algunos ácidos inorgánicos (Mohamed et al., 2023).

El objetivo de este trabajo es analizar los avances, la eficacia, los mecanismos y los desafíos de la degradación fotocatalítica aplicada a los AINEs, basándose en trabajos de investigación mas importantes.

Metodologías de Evaluación Experimental

Para evaluar y comparar la eficacia de los distintos sistemas fotocatalíticos, los estudios se realizan en un conjunto de técnicas analíticas que permiten caracterizar no solo la transformación del contaminante original, sino también la mineralización total y el mecanismo de reacción.

Seguimiento de la Degradación

La técnica estándar en todos los estudios para cuantificar la eliminación del fármaco original es la Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) con detector UV-Vis (Lara-Pérez et al., 2020; González-Pereyra et al., 2024; Mrotek et al., 2020). Esta técnica permite separar y cuantificar la concentración del compuesto original y los intermediarios que se van formando a través del tiempo de reacción.

Medición de la Mineralización

La degradación del compuesto original no implica su eliminación completa. La molécula puede simplemente transformarse en productos intermedios, que pueden ser mas tóxicos que la molécula original. Por lo tanto, la medida para cuantificar la mineralización es el análisis de Carbono Orgánico Total (TOC) (Lara-Pérez et al., 2020; Liu et al., 2021). Dicho estudio refiere que una alta eliminación de TOC indica que el carbono orgánico se está convirtiendo eficazmente en CO_2 .

Identificación de Intermedios y rutas de Degradación

Para entender como procede la degradación del contaminante original y los compuestos que va derivando a través de la reacción, es crucial identificar los subproductos. La mayoría de los estudios emplean técnicas tales como: cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC), espectrometría de masas acoplada, como LC-MS (Liu et al., 2021),

HPLC-MS (Kowalkinska et al., 2023) o, más avanzadas, LC-QToF (Cromatografía Líquida de Tiempo de Vuelo Cuadrupolar) (Jiménez-Salcedo et al., 2021; Chakachaka et al., 2024). Estas técnicas permiten determinar la masa molecular exacta de los intermedios, facilitando la elucidación de las rutas de degradación (hidroxilación, descarboxilación, etc.).

Evaluación de Toxicidad

Varios de los estudios más avanzados van más allá de la química y evalúan la toxicidad de la solución tratada mediante bioensayos. Se utilizan organismos como *Artemia salina* (Sá et al., 2021) o el ensayo Microtox (Kowalkinska et al., 2023) para determinar si los productos de degradación son tóxicos para la vida acuática.

Discusión de resultados

Diclofenaco

El estudio de Lara-Pérez et al. (2020) sobre la degradación de diclofenaco (DCF) con TiO_2 P25 bajo luz UV-vis proporciona una visión fundamental del proceso. Se determinó que la adsorción del contaminante en la superficie del catalizador es un paso crítico y limitante. A un pH natural de 5.8, el DCF ($\text{pK}_a = 4.0$) está cargado negativamente, mientras que la superficie del TiO_2 ($\text{PZC} = 6.35$) está cargada positivamente. Esta atracción electrostática favorece una rápida adsorción (equilibrio en < 50 min) que se ajusta bien al modelo de isoterma de Langmuir.

La cinética de la reacción fotocatalítica no sigue un modelo simple de primer orden, sino que se ajusta perfectamente al modelo de Langmuir-Hinshelwood (L-H). Esto indica que la reacción ocurre en la superficie del catalizador entre un reactivo adsorbido y las ROS generadas (Lara-Pérez et al., 2020). El estudio también confirmó una mineralización eficiente del 83% de TOC para una concentración de 40 ppm a través de la hidroxilación y la apertura de los anillos aromáticos.

Latif et al. (2023) realizaron una comparación directa entre ZnO y ferrita de zinc para la degradación de diclofenaco bajo luz UV. La ZnFe_2O_4 demostró ser mejor, logrando un 61.4% de degradación frente al 48.9% del ZnO . Este mejor rendimiento se atribuyó a que la ferrita de zinc posee una brecha energética (band gap) menor (2.89 eV vs 3.14 eV del ZnO), lo que le permite absorber una porción ligeramente mayor del espectro de luz, además de presentar una mayor estabilidad en la reutilización.

Jiménez-Salcedo et al. (2021) utilizaron nanocapas de $\text{g-C}_3\text{N}_4$ para degradar diclofenaco (DCF) bajo luz solar natural y LEDs de luz blanca, este catalizador actualmente tiene mucho auge ya que es libre de metales. El estudio arrojó resultados mixtos. Por un lado, fue efectivo especialmente en agua corriente, donde los iones cloruro ayudaron y el mecanismo fue dominado por radicales superóxido y huecos generados. Sin embargo, el análisis de productos de degradación fue alarmante: se identificaron cuatro subproductos que, según las reglas de Cramer, fueron clasificados como de alta toxicidad (Clase III).

Naproxeno

Hay que diferenciar la fotodegradación (solo luz) de la fotocatalisis (luz UV + catalizador). González-Pereyra et al. (2024) investigaron la degradación de naproxeno (NPX) y encontraron que, a diferencia del DCF, el NPX (cargado negativamente a pH 6.6) no se adsorbe correctamente en la superficie del catalizador TiO_2 P25. El estudio reveló que la fotólisis (UV-vis) por sí sola es capaz de transformar el 100% del NPX en 3 horas, principalmente por descarboxilación. Sin embargo, esta transformación genera otros compuestos orgánicos y solo el 18% del TOC fue mineralizado. La fotólisis solo convierte el NPX en otros contaminantes aromáticos susceptibles a oxidación fotocatalítica.

La reacción en presencia de un catalizador iluminado con luz UV mineralizó más del 80% del TOC en 4 horas. El mecanismo propuesto es que la fotólisis y la fotocatalisis ocurren en paralelo: la fotólisis transforma el NPX en compuestos intermediarios; y posteriormente el TiO_2 ataca estos intermediarios, creando compuestos polihidroxilados; estos últimos compuestos si se adsorben en la superficie del catalizador y son rápidamente mineralizados (González-Pereyra et al., 2024).

Sepúlveda et al. (2024) investigaron la degradación de naproxeno (NPX) utilizando nanotubos de TiO_2 de tubo único. Estos materiales mostraron una actividad fotocatalítica excepcional, logrando una degradación del 94% del NPX en solo 1 hora bajo luz solar simulada. Este rendimiento superior se atribuye a la alta área superficial, una mejor adsorción y un transporte de carga más eficiente dentro de la estructura tubular.

El estudio de Kowalkinska et al. (2023) sobre la degradación de naproxeno (NPX) con TiO_2 dopado con flúor revela que la ruta de degradación y la toxicidad del efluente dependen de las facetas cristalinas expuestas.

El estudio comparó nanocristales de $\text{TiO}_2\text{-F}$ con diferentes morfologías:

Forma Decaédrica (Facetas {001} dominantes): Estas facetas promovieron una ruta de degradación que generaba dímeros ($\text{C}_{26}\text{H}_{26}\text{O}_4$) como subproductos. Estos dímeros inhibieron la mineralización (baja mineralización).

Forma Octaédrica (Facetas {101} dominantes): Este catalizador fue el más eficiente, logrando el 100% de degradación de NPX en 40 minutos y una alta mineralización de 70%.

Chakachaka et al. (2024) fabricaron membranas de polietersulfona (PES) impregnadas con nanopartículas de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) para la degradación de naproxeno (NPX). El CoFe_2O_4 es atractivo por su bajo band gap (1.85 eV), lo que le permite activarse con luz visible en un simulador solar. Este sistema combina la filtración por membrana con la degradación fotocatalítica. La membrana con mayor carga (1.0% de CoFe_2O_4) logró un 60% de degradación de NPX en 180 minutos, con un mecanismo dominado por radicales OH. El estudio reveló que la incorporación del catalizador mejoraba las propiedades de la membrana: aumentaba la hidrofiliidad (facilitando la interacción agua-catalizador) y la rugosidad (aumentando el área superficial de reacción). Las pruebas de lixiviación (pérdida de metal) fueron mínimas y se mantuvieron por debajo de los límites de la OMS, demostrando la viabilidad del sistema.

Ketoprofeno

En el año 2022 Acosta et al. estudiaron la degradación fotocatalítica del ketoprofeno a alta concentración (hasta 80 ppm) utilizando TiO_2 P25 como catalizador. Los resultados muestran que la adsorción del ketoprofeno en la superficie del catalizador alcanzó el equilibrio en 30 minutos. La adsorción se describe bajo la isoterma de Langmuir teniendo una capacidad máxima de adsorción de 0.0672 mmoles de ketoprofeno por gramo de TiO_2 .

Los datos cinéticos muestran que la velocidad de degradación fotocatalítica sigue la ecuación cinética de Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson (LH-HW), su constante cinética aparente (k_{app}) es de 0.14 min^{-1} y su parámetro de adsorción (K) en la ecuación LH-HW es de 20.72 mM^{-1} . Finalmente, el trabajo concluye que se puede lograr la completa degradación y mineralización del ketoprofeno en 6 horas de reacción.

Acosta et al. (2025) también estudiaron la degradación fotocatalítica del ketoprofeno en agua utilizando un co-catalizador de hexatitanato de potasio dopado con plata ($\text{Ag-K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$). Los materiales fueron sintetizados por el método sol-gel y modificados con foto-deposición de Ag (0.1–0.7 % en peso).

El catalizador con un 0.2 % $\text{Ag-K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ mostró la mejor eficiencia, degradando el ketoprofeno en 30-45 minutos, con una mineralización del 82% en TOC y evidenció la presencia de productos intermediarios a partir de los 15 -30 minutos, mismos que se mineralizaron a CO_2 .

La investigación muestra que la incorporación moderada de Ag favoreció la generación de huecos positivos (h^+) y radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), acelerando la oxidación del ketoprofeno. Pero también indica que un exceso de plata (0.7 %) reduce la actividad catalítica por bloqueo de sitios activos y recombinación de cargas.

Conclusiones

La degradación fotocatalítica de AINEs es una tecnología viable y fuerte, demostrada ampliamente. Los semiconductores simples como TiO_2 y ZnO son efectivos, pero su rendimiento se ve drásticamente superado por modificaciones estructurales y la creación de compósitos.

La Modificación es Esencial: El dopaje (con Ce o F), la creación de compósitos (con $\text{g-C}_3\text{N}_4$ o ferritas magnéticas) y el control morfológico (nanotubos) son muy importantes para mejorar la eficiencia, activar los catalizadores con luz visible y poder llevar a cabo la degradación y mineralización completa.

La Toxicidad debe ser Controlada: La eficiencia de degradación (eliminación del fármaco original) no es el único parámetro. Varios estudios demuestran que una degradación incompleta o una ruta de reacción incorrecta pueden generar subproductos tóxicos. La ingeniería de materiales, como el control de las fases cristalinas es fundamental para garantizar un proceso ambientalmente seguro.

No existe un Mecanismo Único: La especie reactiva dominante no es universal. Depende de la composición, estructura del catalizador y de las condiciones de reacción.

La investigación futura debe continuar enfocándose en el desarrollo de materiales estables, activables por luz solar y, fundamentalmente, que garanticen

la mineralización completa sin la generación de intermediarios tóxicos

Agradecimientos: Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología Grant (FME/2023/SE-08/28)

Declaración

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

Acosta, I., Moctezuma, E., López de la O, K., Leyva, E., & Zermeno, B. (2022). Photocatalytic degradation of high concentration aqueous solutions of ketoprofen: Adsorption, reaction kinetic and product studies. *Topics in Catalysis*, 65(3), 1361-1372. <https://doi.org/10.1007/s11244-022-01653-y>

Acosta, I., González-Pereyra, D., Zermeno, B., Garay-Rodríguez, L. F., & Juárez-Ramírez, I., Moctezuma, E. (2025). Photocatalytic oxidation of ketoprofen in water by silver-potassium hexatitanate co-catalyst. *Topics in Catalysis*, 68, 1652-1667. <https://doi.org/10.1007/s11244-025-02065-4>

Chakachaka, V. M., Tshangana, C. S., Mahlangu, O. T., Mamba, B. B., & Muleja, A. A. (2024). Remediation of a non-steroidal anti-inflammatory drug from aqueous solutions using cobalt ferrite-photocatalytic membranes. *Catalysis Communications*, 187, 106855. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106855>

González-Pereyra, D., Acosta, I., Zermeno, B., Aguilar, J., Leyva, E., & Moctezuma, E. (2024). Photocatalytic Degradation of Naproxen: Intermediates and Total Reaction Mechanism. *Molecules*, 29(11), 2583. <https://doi.org/10.3390/molecules29112583>

Jiménez-Salcedo, M., Monge, M., & Tena, M. T. (2021). The photocatalytic degradation of sodium diclofenac in both ultrapure water and tap water with nanosheets of graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)... [Título inferido]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105827. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105827>

Kowalkinska, M., Sikora, K., Lapinski, M., Karczewski, J., & Zielinska-Jurek, A. (2023). Non-toxic fluorine-doped TiO₂ nanocrystals from TiOF for facet-dependent naproxen degradation. *Catalysis Today*, 413-415, 113959. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.11.020>

Lara-Pérez, C., Leyva, E., Zermeno, B., Osorio, I., Montalvo, C., & Moctezuma, E. (2020). Photocatalytic degradation of diclofenac sodium salt: adsorption and reaction kinetic studies. *Environmental Earth Sciences*, 79, 280. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09017-z>

Latif, S., Liaqat, A., Imran, M., et al. (2023). A comparative study of ZnO and ZnFe₂O₄ as photocatalysts for degradation of diclofenac sodium. *Environmental Research*. [Datos de publicación completos no proporcionados en el documento fuente].

Liu, W., Zhou, J., Zhou, Y., & Liu, D. (2021). Efficient degradation of nimesulide by g-C₃N₄@Bi₂MoO₆ composite combined with peroxymonosulfate under visible light. *Separation and Purification Technology*, 264, 118288. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118288>

Mohamed, K. M., Benitto, J. J., Vijaya, J. J., & Bououdina, M. (2023). Recent Advances in ZnO-Based Nanostructures for the Photocatalytic Degradation of Hazardous, Non-Biodegradable Medicines. *Crystals*, 13(2), 329. <https://doi.org/10.3390/cryst13020329>

Mrotek, E., Dudziak, S., Malinowska, I., Pelczarski, D., Ryżyńska, Z., & Zielińska-Jurek, A. (2020). Improved degradation of etodolac in the presence of core-shell ZnFe₂O₄/SiO₂/TiO₂ magnetic photocatalyst. *Science of the Total Environment*, 724, 138167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138167>

Sá, A. S., Feitosa, R. P., Honório, L., Peña-Garcia, R., Almeida, L. C., Dias, J. S., Brazuna, L. P., Tabuti, T. G., Triboni, E. R., Osajima, J. A., & da Silva-Filho, E. C. (2021). A Brief Photocatalytic Study of ZnO Containing Cerium towards Ibuprofen Degradation. *Materials*, 14(19), 5891. <https://doi.org/10.3390/ma14195891>

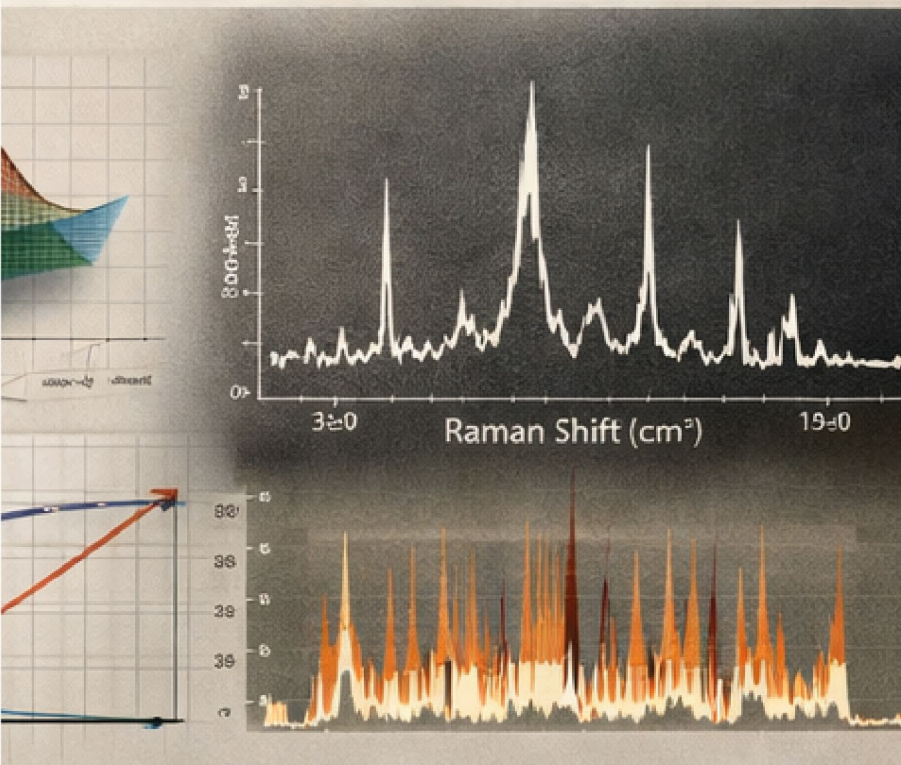
Sepúlveda, M., Musiał, J., Saldan, I., Chennam, P. K., Rodriguez-Pereira, J., Sopha, H., Stanis, B. J., & Macak, J. M. (2024). Photocatalytic degradation of naproxen using TiO₂ single nanotubes. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 5, 1373320. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2024.1373320>

Fecha de recepción: 25 de octubre de 2025.

Fecha de aprobación: 07 de noviembre de 2025.



UNACAR®
Universidad Autónoma del Carmen
"Por la Grandeza de México"

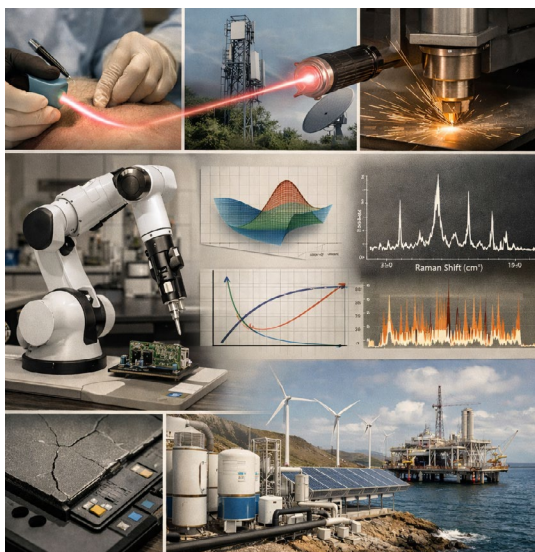


Acalán Revista de la Universidad Autónoma del Carmen

Julio - Diciembre
2025

Número 121
Edición Especial Parte 2

ISSN 2594 1658



Diseño de portada realizada con fotografías autorizadas por los autores de los artículos contenidos en esta edición especial.

Dr. Juan Antonio Álvarez Arellano
Coordinador de la Edición Especial Parte 2

Acalán Revista de la Universidad Autónoma del Carmen No. 121, Julio - Diciembre 2025, edición especial parte 2. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Carmen, a través de la Dirección General de Extensión Universitaria, por el Departamento de Fomento Editorial, Av. 56 No. 4 Col. Benito Juárez. C.P. 24180 Ciudad del Carmen, Campeche, teléfono 9383811018, www.unacar.mx. Editor responsable LDG. Ana Isabel Polkey Gómez, Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2015-042113060500-203. ISSN 2594-1658. Responsable de la última actualización de este número, Coordinación de Tecnologías de la Información y la Comunicación UNACAR, Maestro Raúl Arturo Peralta. Calle 56 número 4, esquina avenida Concordia. Col. Benito Juárez. C.P. 24180. Ciudad del Carmen, Campeche. Fecha de última modificación, 6 de febrero del 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma del Carmen.

Dra. Sandra Martha Laffon Leal
Rectora

Lic. Javier Zamora Hernández
Secretario General

Dra. Heidi Angélica Salinas Padilla
Secretaría Académica

Mtro. Joel Adir Acuña Gálvez
Director General de
Extensión Universitaria

Mtra. Yuridia Raquel Velasco Sosa
Directora de Difusión Cultural

LDG. Ana Isabel Polkey Gómez
apolkey@delfin.unacar.mx
Jefa de Fomento Editorial
Editor responsable
Diagramación

Directorio

Dr. Ricardo Armando Barrera Cámara
Facultad de Ciencias de la Información

MMI. Rafael Ferrer Méndez
Facultad de Ciencias Educativas

Dra. Myrna Delfina López Noriega
Facultad de Ciencias Económicas
Administrativas

Dra. Lucely Maas Góngora
Facultad de Ciencias de la Salud

Dr. Carlos Montalvo Romero
Facultad de Química

Dr. Leonardo Palemón Arcos
Facultad de Ingeniería

Dra. María Elena Reyes Monjaras
Facultad de Derecho

Comité Editorial

Representantes Invitados

Dra. Ana Alberta Canepa Saénz
Facultad de Ciencias de la Información

Dra. Angélica Gabriela Vital Ocampo
Facultad de Química



Contenido

5.-

De valles, picos y algoritmos: entendiendo funciones para optimización

García Sigales Bryand Javier
Álvarez Ake Daniela Alejandra
Zavala Carballo Moisés de Jesús
Carballo Vázquez Leilani Elizabeth
Ruz Hernández José Antonio
Romero Sotelo Francisco Javier

16.-

Espectroscopía Raman, revelando la materia con luz

Pavón Moreno Julio Alberto
Escorza Reyes Marisol
Flores Gil Aarón
Flores Trujillo Juan Gabriel

26.-

Análisis de datos de sensores: develando secretos ocultos en microfisuras y otros tipos de fallas

Romero Sotelo Francisco Javier
Rodríguez Blanco Marco Antonio
Pérez Montejo Salatiel
García Sigales Bryand

41.-

El arte de enseñar a un robot a mover su brazo

Pacheco Richard Jorge Gabriel
Cortés Vega David
Vázquez Ávila José Luis
Alazki Hussain

51.- Cómo obtener hidrógeno del agua de
mar: la nueva energía limpia en camino.
La historia, los desafíos y el futuro de
una tecnología clave para enfrentar el
cambio climático

López Oliveros Mariano
Álvarez Arellano Juan Antonio
Hamzaoui Youness El

58.- Más que luz: el secreto detrás del láser

Aguilar Cruz Félix
Flores Gil Aarón
Patiño Carachure Cristóbal

La revista Acalán presenta esta edición especial como un puente entre la investigación y la vida cotidiana. En un contexto donde el conocimiento científico debe circular con claridad, oportunidad y sentido social, la divulgación se vuelve una responsabilidad compartida: explicar qué se investiga, por qué importa y cómo puede transformar entornos productivos, educativos y comunitarios. Con esa convicción, esta entrega reúne aportes de divulgación derivados del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR). Bajo el principio del derecho humano a la ciencia, buscamos que los hallazgos sean comprensibles y útiles para decisiones públicas y privadas informadas.

El Doctorado, iniciado con su primera generación en agosto de 2022 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, promueve formación avanzada, trabajo interdisciplinario y compromiso regional. Su quehacer se organiza en tres Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) que interactúan entre sí: Control de Sistemas Dinámicos; Caracterización de Materiales por Métodos Ópticos; y Estructuras y Tecnología de Materiales Avanzados. Estas líneas permiten abordar problemas complejos con herramientas matemáticas, experimentales y computacionales.

Los artículos seleccionados reflejan esa diversidad con lenguaje accesible y rigor técnico. El lector encontrará una mirada al impacto del láser en medicina, comunicaciones y manufactura; herramientas computacionales que permiten clasificar funciones y orientar la elección de métodos de optimización; y una introducción a la espectroscopía Raman como “huella digital” para reconocer sustancias y apoyar la detección de adulteraciones o contaminantes. Se incluyen, además, propuestas para interpretar datos de sensores y detectar microfisuras de manera temprana, el desarrollo de trayectorias para un brazo robótico con fines educativos y el análisis del potencial del hidrógeno verde a partir de agua de mar, como alternativa dentro de la transición energética.

En conjunto, estos trabajos muestran que investigar también es comunicar: convertir resultados, métodos y prototipos en conocimiento útil para la sociedad. Agradecemos a las y los autores por compartir su experiencia con responsabilidad social y a nuestras lectoras y lectores por sostener este diálogo. Que estas páginas inspiren preguntas, colaboraciones y nuevas vocaciones científicas. Porque la ciencia se fortalece cuando se comprende y se comparte.

Dr. Juan Antonio Álvarez Arellano
Profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Coordinador del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería
Universidad Autónoma del Carmen

De valles, picos y algoritmos: entendiendo funciones para optimización

García Sigales Bryand Javier⁽¹⁾
Álvarez Ake Daniela Alejandra⁽¹⁾
Zavala Carballo Moisés de Jesús⁽¹⁾
Carballo Vázquez Leilani Elizabeth⁽¹⁾
Ruz Hernández José Antonio⁽¹⁾
Romero Sotelo Francisco Javier⁽¹⁾

RESUMEN

Se presenta una herramienta desarrollada en MATLAB para analizar y clasificar funciones matemáticas en contextos de optimización. Mediante gráficos, derivadas, matriz Hessiana y análisis de continuidad y multimodalidad, permite identificar el tipo de función y sugerir el método de optimización más adecuado. Se aplicó a seis funciones representativas, tanto univariable como multivariables, abarcando casos convexos, no convexos y discontinuos. Los resultados se resumen en una tabla comparativa que orienta sobre la elección del algoritmo según la geometría del problema. Esta herramienta facilita la comprensión y selección de estrategias para estudiantes y profesionales.

Palabras Claves

Optimización, clasificación de funciones, MATLAB

ABSTRACT

A tool developed in MATLAB is presented for analyzing and classifying mathematical functions in optimization contexts. Through graphs, derivatives, the Hessian matrix, and analysis of continuity and multimodality, it enables the identification of the function type and suggests the most suitable optimization method. It was applied to six representative functions, both univariate and

multivariate, covering convex, non-convex, and discontinuous cases. The results are summarized in a comparative table that guides the selection of algorithms based on the geometry of the problem. This tool facilitates understanding and strategy selection for students and professionals.

Keywords

Optimization, function classification, MATLAB

Introducción

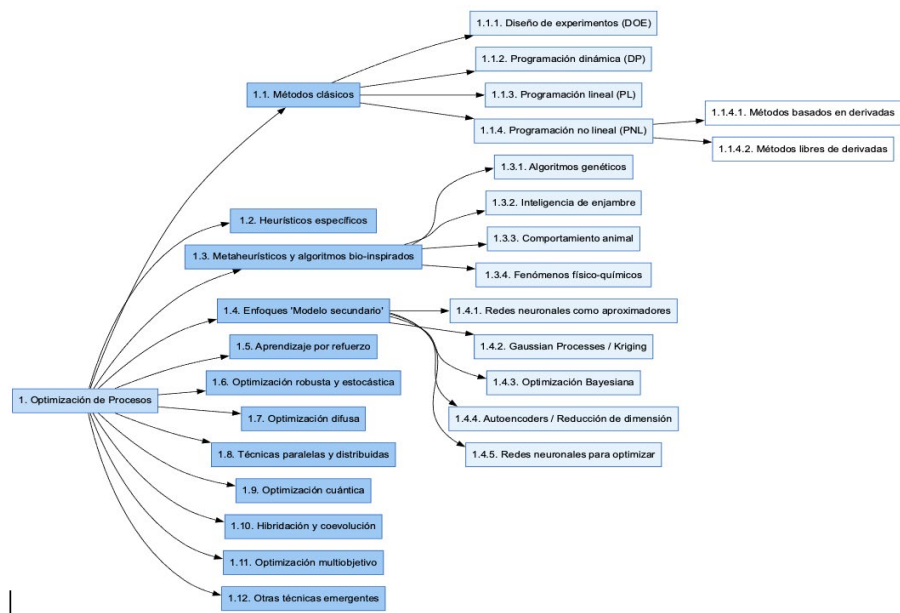
En un mundo donde cada segundo y recurso cuenta, la optimización es la ciencia de hacer más con menos. Esta búsqueda incansable de la excelencia no solo beneficia a las grandes industrias; impacta directamente en nuestra vida diaria. Piensa en cómo tu aplicación de mapas favorita encuentra la ruta más rápida para llegar al trabajo, cómo los sistemas inteligentes gestionan el ahorro de energía en nuestros hogares ajustando la calefacción y la refrigeración, o incluso cómo las instituciones educativas optimizan sus horarios y recursos para ofrecer la mejor experiencia de aprendizaje. Pero ¿cómo encontrar esa aguja en un pajar de posibilidades? Según expertos como Cuevas et al., (2016), la respuesta está en explorar sistemáticamente, usando técnicas que van desde matemáticas puras hasta algoritmos

⁽¹⁾ Universidad Autónoma del Carmen, Av. Central S/N con Fracc. Mundo Maya CP. 24115, Ciudad del Carmen, Campeche, México.

que imitan la naturaleza. Hoy tenemos un verdadero “menú” de métodos (Figura 1). Los clásicos, como la programación lineal, son como recetas exactas para problemas con reglas claras. Los más modernos, como los algoritmos genéticos, evolucionan soluciones como lo haría una especie biológica. Y en la frontera, la inteligencia artificial y la computación cuántica prometen revolucionar cómo optimizamos.

La Figura 1 no solo ordena este universo: es un mapa para elegir la herramienta correcta. ¿El problema es impredecible? La optimización estocástica tiene la respuesta. ¿Hay que considerar múltiples objetivos a la vez? Las técnicas multiobjetivo entran en juego. La optimización ya no es solo para ingenieros: es una mentalidad que transforma industrias (Alanis, Arana-Daniel y Lopez-Franco, 2018).

Figura 1. Taxonomía y clasificación de las técnicas de optimización.

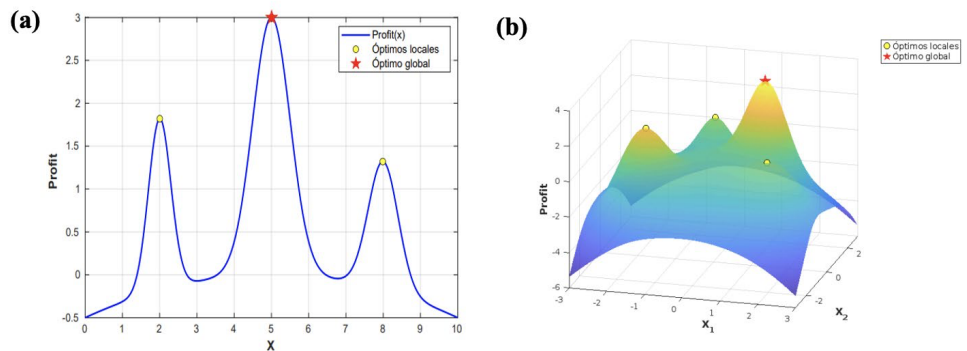


De acuerdo con Nath (2024), no todas las soluciones son iguales. Un óptimo local es como un valle pequeño, es decir la mejor solución en su vecindad, pero no necesariamente la global. Por otro lado, un óptimo global es el punto más bajo de todo el terreno (o el más alto, si maximizamos). Esta diferencia crítica entre óptimos locales y globales queda visualmente clara al examinar la Figura 2, En 2 (a), para problemas con una sola variable, vemos cómo un óptimo local (valle secundario) puede engañar a los algoritmos, mientras el global sigue siendo el punto más profundo. En 2 (b), con dos variables, el

paisaje se vuelve más complejo: aparecen múltiples picos y valles donde los métodos clásicos podrían estancarse sin encontrar la verdadera solución óptima.

Este comportamiento explica por qué la naturaleza del paisaje de soluciones determina el éxito o fracaso de los algoritmos. Como veremos a continuación, reconocer estas características es el primer paso para seleccionar estratégicamente entre métodos clásicos (eficientes en terrenos simples) y metaheurísticos (capaces de navegar complejidades).

Figura 2. Óptimos locales y globales para un problema hipotético de maximización de beneficios: (a) problema con una variable y (b) problema con dos variables.



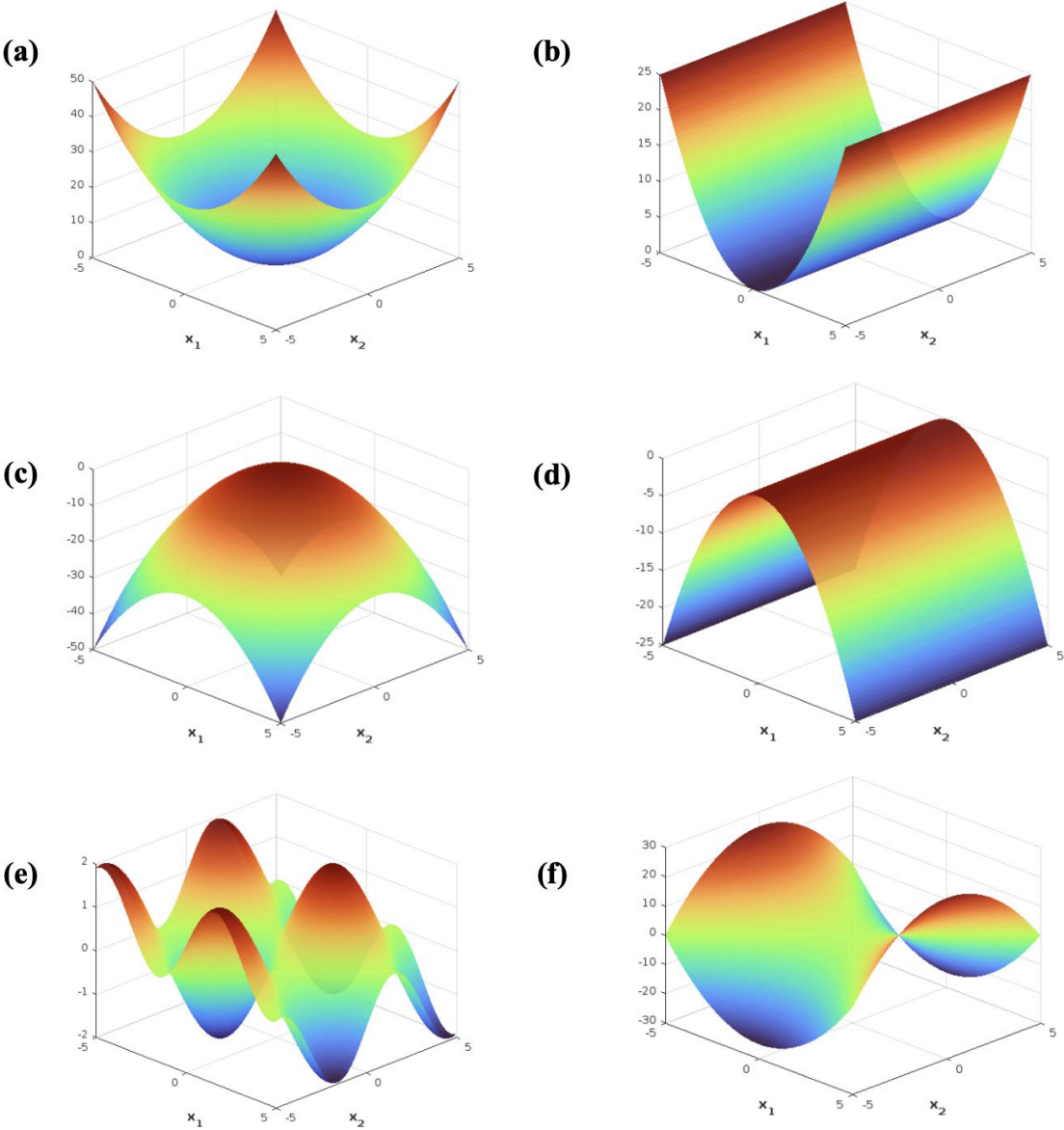
Imagina un valle perfecto (Figura 3a-b), donde cualquier paso hacia abajo te lleva directamente al punto más bajo. Este es el mundo predecible de las funciones convexas: formas matemáticas 'bien portadas' donde métodos clásicos actúan como brújulas infalibles.

Pero no todos los paisajes son tan amables. Observa en la Figura 3e-f esos terrenos con múltiples hoyos (óptimos locales) y crestas engañosas. Aquí, los algoritmos tradicionales quedan atrapados en falsas

soluciones, como caminantes perdidos en una montaña. ¿La salvación? Algoritmos bioinspirados, (Segovia-Hernández y Gómez-Castro, 2017). La Figura 3 nos revela que:

- (a-b) Funciones convexas: Solo un "valle", sin sorpresas.
- (c-d) Funciones cóncavas: El espejo de las convexas (útiles para maximización).
- (e-f) No convexas: Territorio peligroso que exige metaheurísticos.

Figura 3. Funciones convexas y no convexas: (a) función estrictamente convexa, (b) función convexa, (c) estrictamente cóncava, (d) función cóncava, (e) función no convexa con varios óptimos locales, y (f) función no convexa sin solución óptima.



Para ilustrar cómo se comportan distintos tipos de funciones matemáticas y cómo estas influyen en la elección del método de optimización, desarrollamos una herramienta en MATLAB, el esquema del funcionamiento se encuentra más adelante (ver Figura 4) este analiza y visualiza funciones tanto de una como de varias variables. Esta herramienta permite observar gráficamente el comportamiento de las funciones en términos de continuidad, convexidad y presencia de múltiples óptimos, facilitando así su clasificación automática y la recomendación de técnicas de optimización adecuadas.

Las funciones seleccionadas (ver Tabla 1) no fueron elegidas al azar: incluyen desde ejemplos simples, como funciones cuadráticas y logarítmicas, hasta casos ampliamente reconocidos como bancos de prueba en la literatura de optimización, como las funciones Rastrigin y Rosenbrock (“banana”). Esta selección cubre una amplia gama de retos matemáticos, desde funciones convexas con un solo mínimo, hasta funciones multimodales y discontinuas, permitiendo así poner a prueba y comparar distintas estrategias de optimización.

Para garantizar un análisis representativo, cada función se evaluó sobre un rango definido y utilizando una discretización fina (con cientos o miles de puntos en el dominio), lo que permitió detectar tanto tendencias globales como detalles locales, y evitar artefactos numéricos. Además, se incluyeron funciones discontinuas o con saltos a propósito, para analizar cómo los métodos automáticos pueden reconocer estos escenarios y sugerir técnicas robustas.

Los pasos principales aplicados a cada función fueron:

1. Evaluación gráfica: Se generaron gráficas de las funciones, ya sea en forma de curvas (para funciones de una variable) o de superficies y contornos (para funciones de dos variables), lo que permitió identificar visualmente características como crestas, valles, simetrías y discontinuidades.

2. Análisis de derivadas: En las funciones continuas de una sola variable, se calcularon numéricamente la primera y segunda derivadas. Esto facilitó la identificación de regiones convexas o cóncavas, así como la localización de posibles puntos de inflexión.

3. Detección automática de multimodalidad:

Se emplearon algoritmos automáticos para localizar los máximos y mínimos locales, tanto en 1D como en 2D. El número de estos picos proporciona una medida objetiva de la complejidad del paisaje de soluciones y del posible desafío que enfrenta un método de optimización.

4. Estimación de la matriz Hessiana: Para las funciones multivariables, se calculó la matriz Hessiana en un punto representativo del dominio. Esta matriz permite caracterizar la curvatura local y distinguir entre funciones convexas, cóncavas o indefinidas en la región de análisis.

5. Clasificación y recomendación automatizada: Integrando toda la información anterior, la herramienta clasificó cada función según su naturaleza (continua, discontinua, convexa, no convexa, multimodal, etc.) y generó una sugerencia automática sobre el tipo de método de optimización más adecuado, diferenciando entre algoritmos clásicos (basados en derivadas) y metaheurísticos robustos o bioinspirados para casos más complejos.

6. Registro tabular de resultados: Finalmente, todos los datos relevantes—nombre de la función, dimensión, número de picos locales, clasificación, sugerencia de método y ejemplo de técnica—fueron organizados en una tabla resumen. Esta tabla facilita la comparación directa entre funciones y sirve como una guía práctica para elegir estrategias de optimización en diferentes escenarios.

Esta metodología no solo facilita el análisis objetivo y reproducible de funciones para optimización, sino que también proporciona a estudiantes e investigadores una referencia visual y cuantitativa para seleccionar el método más adecuado en función del problema específico.

Resultados y Discusión

Una función matemática no es solo una fórmula: es un paisaje que puede ser suave y predecible como una colina, o traicionero y complejo como una cadena montañosa con niebla. En esta sección, exploramos qué tan fácil o difícil es optimizar distintas funciones, y cómo su forma afecta la elección del algoritmo más adecuado para encontrar el mejor resultado.

Para ello, se analizaron seis funciones representativas —algunas univariable, otras multivariables— mediante una herramienta desarrollada en MATLAB. Este sistema no solo calcula, sino que ve, mide y clasifica: genera gráficos, estima derivadas,

cuenta óptimos locales y evalúa curvaturas a través de la matriz Hessiana. Con base en estos elementos, propone un tipo de método de optimización ideal para cada caso.

Figura 4. Diagrama de flujo para caracterizar funciones y sugerir métodos de optimización.

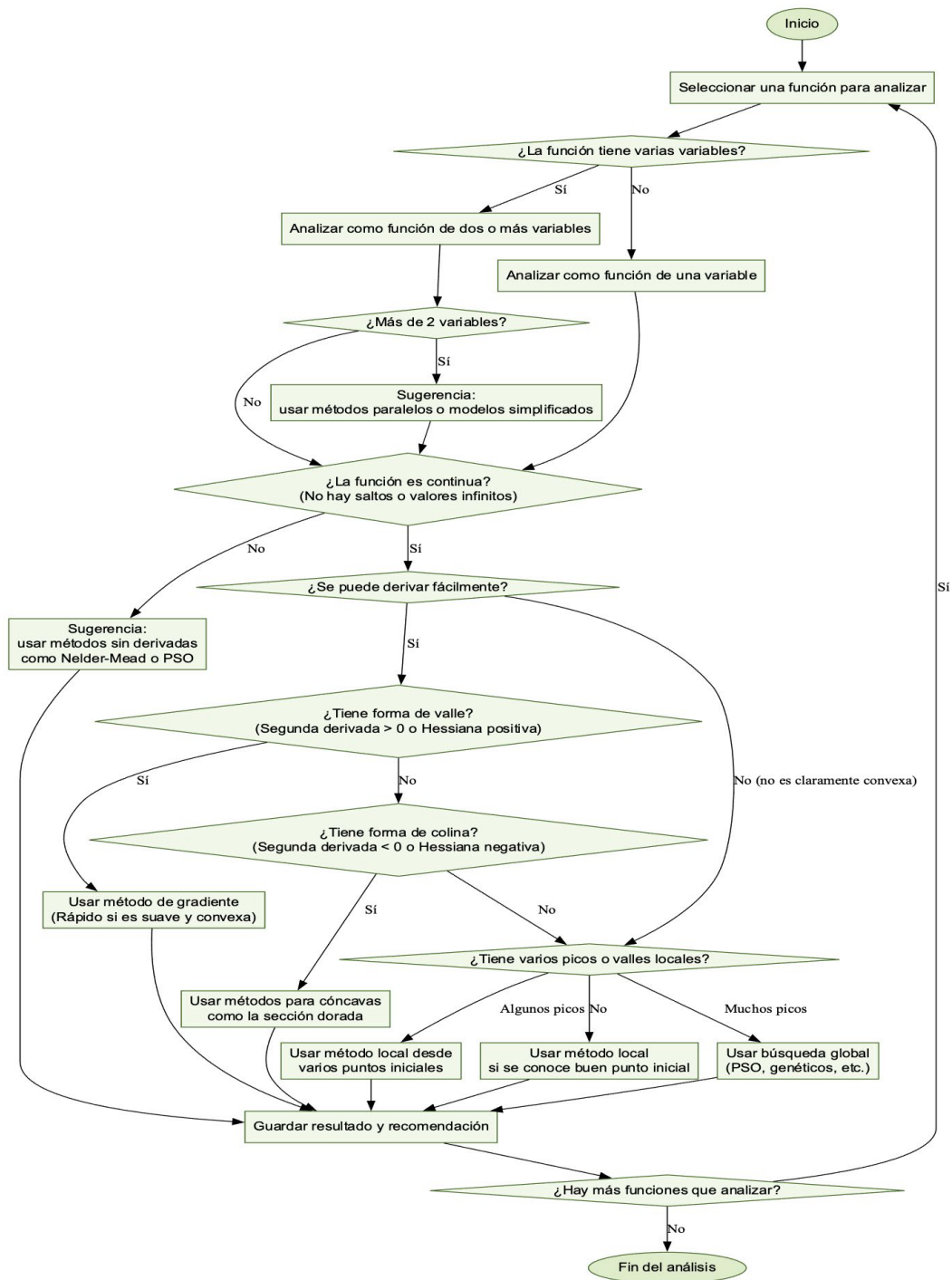


Tabla 1. Funciones seleccionadas para la evaluación.

Nombre de la Función	Función Matemática	Ejemplos de Aplicación
Cuadrática	$(x - 3)^2 + 1$	Es la base para muchos modelos de predicción, desde física hasta economía. Se usa en todo, desde ajustar curvas de datos hasta entrenar inteligencia artificial.
Logarítmica	$\log(x + 1)$	En economía este tipo de funciones puede modelar utilidad marginal decreciente y en redes sociales puede medir el impacto o alcance
Sinusoidal lineal	$\text{sen}(x) + 0.5x$	Simula señales de sonido o luz que crecen con el tiempo. Se puede usar para modelar fenómenos que tienen patrón cíclico, pero también aumentan.
Banana (Rosenbrock)	$(1 - x_2)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2$	Se usa para probar algoritmos de optimización en problemas no lineales. Aparece en modelos económicos y entrenamiento de redes neuronales.
Rastrigin	$20 + \sum (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i))$	Se usa para evaluar algoritmos en situaciones con muchas soluciones posibles. Ideal para probar técnicas en contextos complejos como diseño de antenas o planificación logística.
Racional Hiperbolica	$\frac{1}{x_1 + x_2}$	Análisis de costos compartidos en economía y resistencias en paralelo.

Nota: Los ejemplos aquí mencionados de aplicación no limitan a la función de otras posibles aplicaciones, estas funciones matemáticas no solo son herramientas abstractas: son modelos que ayudan a resolver problemas reales en ciencia, tecnología, economía y más.

La Tabla 2 presenta los resultados principales: dimensión de cada función, número de óptimos locales (“picos”), clasificación matemática (como convexa, cóncava, discontinua, etc.), tipo de método sugerido y ejemplos concretos de algoritmos compatibles.

Por ejemplo, la función cuadrática (ver Figura 5), que tiene una única curvatura suave y simétrica, fue clasificada como continua y convexa, ideal para métodos clásicos como Newton o gradiente descendente. Lo mismo ocurre con la función banana (Rosenbrock), que, aunque es más retorcida en su forma, mantiene una curvatura adecuada para técnicas con derivadas si se parte de una buena aproximación inicial.

En contraste, la función sinusoidal lineal (ver Figura 7) presentan múltiples máximos y mínimos

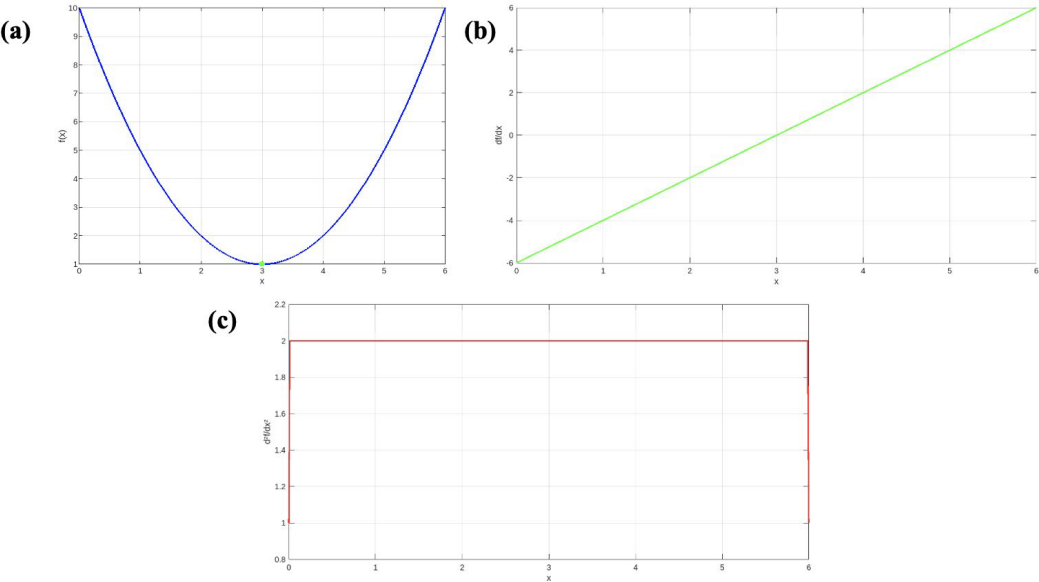
locales. Estas formas onduladas hacen que los algoritmos tradicionales —que siguen la pendiente más cercana— se queden atrapados en soluciones subóptimas. En estos casos, la herramienta recomienda utilizar algoritmos metaheurísticos o bioinspirados, como PSO (optimización por enjambre de partículas) o algoritmos genéticos, que pueden explorar mejores paisajes con múltiples valles y picos.

La función racional hiperbólica representa un caso extremo. Al ser discontinua —es decir, tener una asíntota o región indefinida—, las derivadas no existen en todo el dominio. Aquí, el sistema detectó automáticamente la inestabilidad numérica y sugiere evitar por completo los métodos que dependen de la derivada. En su lugar, se recomiendan algoritmos robustos sin gradiente.

Tabla 2. Resumen de funciones analizadas.

Nombre	Dimensión	Número de Óptimos	Clasificación	Sugerencia	Ejemplo
Cuadrática	1	1	Función continua y convexa.	Métodos clásicos de PNL basados en derivadas.	Newton, Gradiente Descendente.
Logarítmica	1	0	Función continua y cóncava.	Métodos clásicos de PNL basados en derivadas.	Sección dorada, Fibonacci.
Sinusoidal lineal	1	3	Función continua, no convexa y multimodal (muchos óptimos locales).	Metaheurísticos o algoritmos bio-inspirados.	Algoritmos genéticos, PSO.
Banana (Rosenbrock)	2	3	Función continua y convexa (en punto analizado).	Métodos clásicos de PNL basados en derivadas.	BFGS, Newton.
Rastrigin	2	100	Función continua, no convexa y multimodal (muchos óptimos locales).	Metaheurísticos o algoritmos bio-inspirados.	PSO, algoritmos genéticos.
Racional Hiperbolica	2	288	Función discontinua (o con saltos/indefiniciones).	Metaheurísticos o algoritmos bio-inspirados.	PSO, algoritmos genéticos.

Figura 5. Función cuadrática (a) Representación de la función $(x - 3)^2 + 1$ (b) Su primera derivada muestra una pendiente lineal creciente, confirmando su convexidad. (c) La segunda derivada constante y positiva indica una curvatura uniforme hacia arriba.



Las funciones univariadas se representaron con tres gráficas: la función misma, su primera derivada y la segunda derivada. Esta triple vista permite interpretar no solo la forma general de la función, sino también cómo varía la pendiente y qué tan “curvada” es la superficie. En la función cuadrática, la curva tiene una forma perfectamente convexa. Su derivada primera es lineal y cruza por cero justo en el mínimo; la derivada segunda es constante y positiva. Esto confirma que es una función “bien portada”, ideal para métodos locales. La función logarítmica (ver Figura 6) muestra una pendiente que disminuye, con derivadas decrecientes. Esto indica una función cóncava, que puede maximizarse eficientemente con métodos clásicos, aunque para minimizarla, la solución se “fuga” al extremo del

dominio. En la función sinusoidal lineal, las gráficas revelan tres picos y valles: un claro signo de multimodalidad. La derivada cambia de signo varias veces y la segunda derivada oscila, mostrando una complejidad que requiere métodos globales.

Cuando se trata de funciones de varias variables, como las que se usan para probar algoritmos de optimización, las matemáticas se vuelven más difíciles de imaginar. Para ayudar a interpretar estas funciones, se generaron tres tipos de visualizaciones: una superficie 3D, un mapa de contorno con flechas que representan el gradiente (la dirección de la pendiente), y un mapa de calor de la matriz Hessiana, que describe la curvatura de la función en un punto.

Figura 6. Función logarítmica: (a) Representación de la función $\log(x + 1)$ (b) Su primera derivada muestra una pendiente lineal creciente, confirmando su convexidad. (c) La segunda derivada constante y positiva indica una curvatura uniforme hacia arriba.

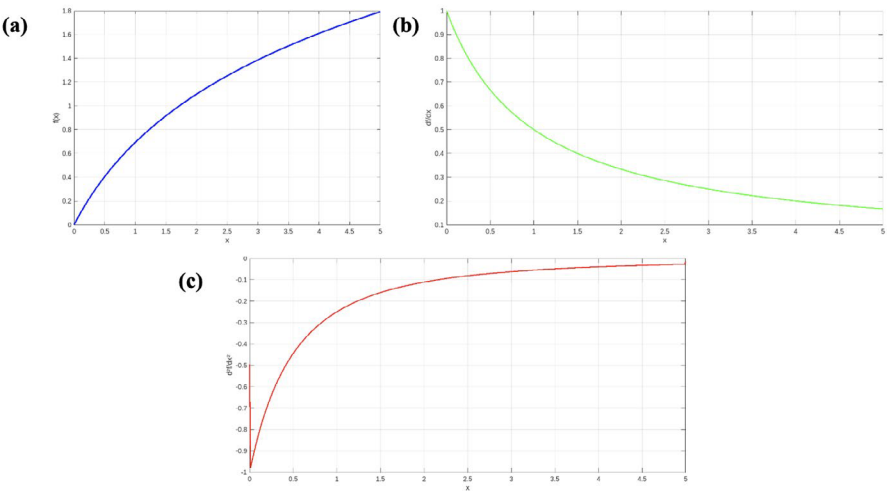
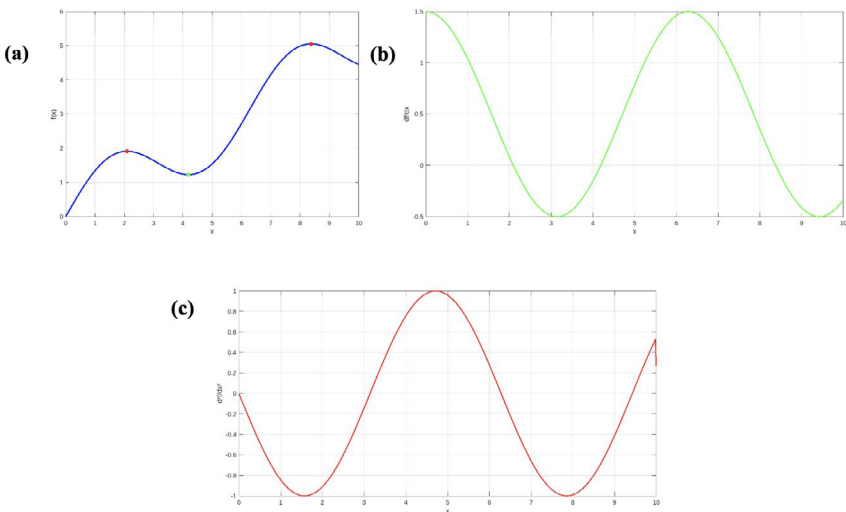


Figura 7. Función Sinusoidal lineal: (a) Gráfica de $\sin(x) + 0.5x$, función continua y multimodal. (b) Su primera derivada cambia de signo, mostrando múltiples pendientes locales. (c) La segunda derivada alterna entre positiva y negativa, indicando curvatura variable.



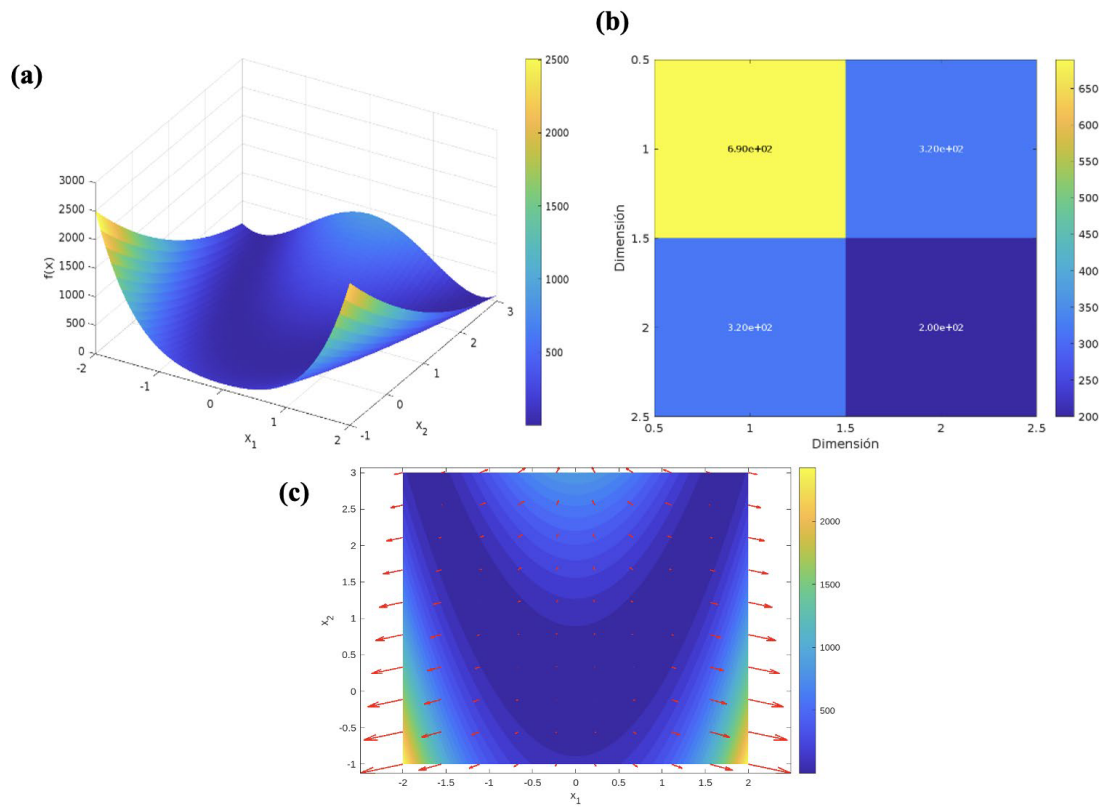
En la función de Rosenbrock (Figura 8) —también conocida como “banana”— se observa un valle curvo y alargado. Las flechas de gradiente apuntan suavemente hacia el mínimo, y la matriz Hessiana muestra que la curvatura es positiva en todas las direcciones. Esto significa que un algoritmo como Newton o BFGS, que usa derivadas, funcionará muy bien, siempre que comience cerca del mínimo. Es como caminar por un sendero estrecho y descendente, donde basta con seguir la inclinación del terreno.

En contraste, la función Rastrigin (Figura 9) parece una alfombra ondulada con muchísimos picos. El contorno revela varias “islas” de soluciones, y las flechas de gradiente apuntan en direcciones cambiantes. Aunque la curvatura en un punto pueda parecer adecuada, el resto del terreno es traicionero.

Aquí, los métodos clásicos se pierden fácilmente, por lo que se recomienda usar algoritmos inspirados en la naturaleza, como enjambres de partículas o evolución genética, que pueden explorar múltiples regiones a la vez.

Finalmente, en la función racional hiperbólica (Figura 10), el terreno se quiebra bruscamente a lo largo de una línea diagonal. Allí, la función se dispara al infinito y deja de estar bien definida. Las flechas de gradiente apuntan con violencia hacia los bordes y la matriz Hessiana muestra números muy grandes y negativos. Esta combinación indica que el terreno es inestable y peligroso para métodos basados en derivadas. En este tipo de funciones, solo los algoritmos que no dependen de información precisa de la pendiente pueden encontrar una solución útil.

Figura 8. Función Banana: $(1 - x_2)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2$: (a) Superficie en 3D con un valle curvado, típico problema de optimización difícil. (b) Matriz Hessiana visualizada, muestra una curvatura pronunciada en direcciones distintas. (c) Contorno con campo de gradientes que apunta al mínimo dentro del valle.



En resumen, estas visualizaciones no solo muestran la forma de la función, sino que también revelan pistas cruciales sobre cómo optimizarla. Las líneas de contorno ayudan a ver la distribución de soluciones, las flechas de gradiente muestran cómo se movería un algoritmo, y la matriz Hessiana nos dice si

estamos en una región estable o peligrosa. Gracias a esta combinación, es posible elegir la herramienta adecuada antes de comenzar la optimización, evitando errores costosos y acelerando el camino hacia la mejor solución.

Figura 9. Función Rastrigin: $20 + \sum (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i))$: (a) Superficie multimodal con numerosos óptimos locales. (b) La Hessiana refleja alta variabilidad y complejidad en la curvatura. (c) Contorno denso con vectores de gradiente divergentes, típico de funciones difíciles para métodos locales.

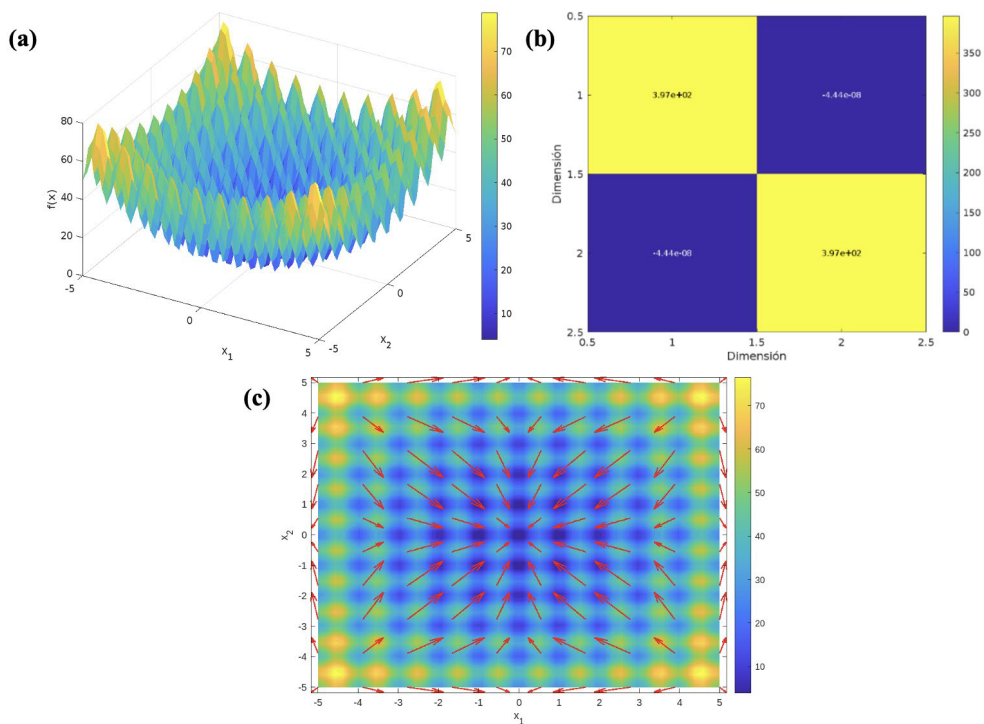
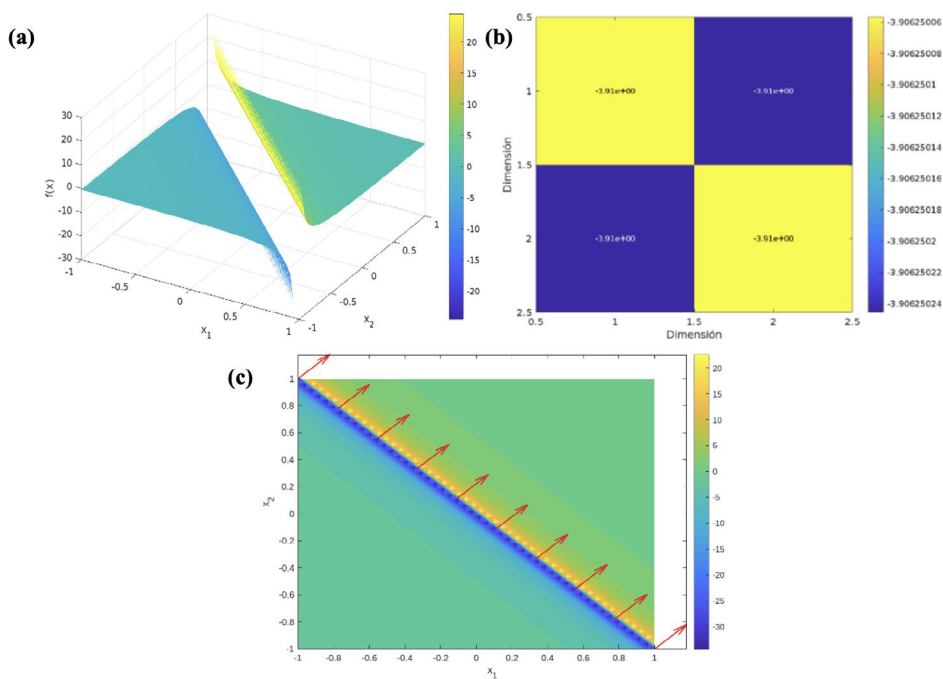


Figura 10. Función con discontinuidad $\frac{1}{x_1+x_2}$: (a) Superficie que presenta una discontinuidad en una región diagonal. (b) La Hessiana muestra valores extremos y no confiables. (c) Contorno con vectores de gradiente interrumpidos o erráticos debido a la falta de suavidad.



Conclusiones

Los resultados muestran que la forma de una función influye directamente en el desempeño de un algoritmo de optimización. Mientras que las funciones convexas, con un solo mínimo, pueden resolverse eficazmente mediante métodos clásicos basados en derivadas, las no convexas, multimodales o discontinuas requieren algoritmos más robustos, como los metaheurísticos o aquellos libres de derivadas.

Visualizar la función —ya sea mediante gráficas, derivadas, contornos o campos de gradiente— facilita su comprensión y permite anticipar posibles dificultades. La matriz Hessiana, en particular, aporta información valiosa sobre la curvatura local, ayudando a identificar regiones estables o conflictivas.

La herramienta desarrollada ofrece así una guía práctica para clasificar funciones y elegir estrategias adecuadas, reduciendo el riesgo de aplicar métodos ineficientes. Este enfoque resulta útil tanto en entornos académicos como en aplicaciones reales, donde cada evaluación puede tener un costo significativo.

Como trabajo futuro, se propone implementar los algoritmos de optimización sugeridos, permitiendo resolver automáticamente cada función. También se busca integrar enfoques adicionales (como redes neuronales, optimización bayesiana o métodos paralelos) y, de manera especial, aplicar la herramienta al análisis de funciones reales en ingeniería, como las que surgen en procesos industriales, energía o logística.

Declaración de conflicto de interés.

Los autores del presente trabajo declaramos no tener ningún tipo de conflicto de interés, ni financiero ni de relaciones personales que puedan influir en el presente artículo enviado a esta revista.

Referencias

- Alanis, A. Y., Arana-Daniel, N., y Lopez-Franco, C. (2018). *Bio-inspired algorithms for engineering* (1st ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813788-8.00001-9>
- Cuevas Jiménez, E. V., Oliva Navarro, D. A., Díaz Cortés, M. A., Osuna Enciso, J. V. (2016). *Optimización: Algoritmos Programados con MATLAB*. Colombia: Alpha Editorial.

- Nath, R. (2024). *Industrial process plants: Global optimization of utility systems*. Walter de Gruyter.
- Kookos, I. K. (2022). *Practical chemical process optimization: With MATLAB® and GAMS®*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11298-0>
- Segovia-Hernández, J. G., y Gómez-Castro, F. I. (2017). *Stochastic process optimization using Aspen Plus®*. Boca Raton, FL: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315151385>

Fecha de recepción: 1 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación: 3 de diciembre de 2025.

Espectroscopía Raman, revelando la materia con luz

Pavón Moreno Julio Alberto⁽¹⁾

Escorza Reyes Marisol⁽²⁾

Flores Gil Aarón⁽¹⁾

Flores Trujillo Juan Gabriel⁽¹⁾

RESUMEN

La espectroscopía Raman es una técnica óptica no invasiva que identifica la composición química de los materiales a través de la interacción luz-materia. Basada en el descubrimiento de C.V. Raman (1928), detecta cambios mínimos en la frecuencia de la luz dispersada cuando un láser incide sobre la muestra. Estos cambios, característicos de cada sustancia, actúan como "huellas digitales moleculares" que se capturan sin contacto físico ni daño a la muestra. Este artículo explica de manera accesible los fundamentos del efecto Raman, abarcando el comportamiento dual de la luz y los tipos de dispersión. Además, detalla los componentes de la técnica espectroscópica Raman y presenta una serie de aplicaciones científicas y tecnológicas de alto impacto. Entre los casos destacados se encuentran: la detección de adulteraciones alimentarias, el monitoreo de cultivos en suelos lunares simulados, el diagnóstico temprano de cáncer endometrial sin cirugía, la autenticación no destructiva de obras de arte y el análisis de contaminantes, como microplásticos, en el agua que bebemos. Pese a sus ventajas, como portabilidad, precisión y capacidad de análisis en tiempo real, esta técnica enfrenta desafíos como la interferencia por fluorescencia, que es un fenómeno que puede enmascarar señales importantes de las sustancias a identificar. No obstante, se han desarrollado estrategias avanzadas para mitigar este problema, el enfriamiento por fluorescencia o el fotoblanqueo, así como técnicas

específicas que a través del uso de múltiples láseres o el agregado de partículas nanométricas, logrando amplificar la señal Raman de una sustancia para su identificación. En conclusión, la espectroscopía Raman se ha consolidado como una herramienta indispensable en diversas disciplinas, como la medicina, el arte, la agricultura, la farmacéutica, la ciencia forense y la exploración espacial. Su capacidad para estudiar la materia en profundidad sin destruirla o alterarla abre continuamente nuevas posibilidades de investigación y aplicación.

Palabras clave

espectroscopía Raman, luz, composición molecular, aplicaciones científicas, identificación no invasiva.

ABSTRACT

Raman spectroscopy is a noninvasive optical technique that identifies the chemical composition of materials through light-matter interactions. Based on the discovery of C.V. Raman (1928), it detects subtle shifts in the frequency of scattered light when a laser interacts with a sample. These changes, characteristic of each substance, act as "molecular fingerprints" that are captured without any physical contact or damage to the sample. This article presents in an accessible manner the fundamentals

⁽¹⁾ Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Ingeniería, Edificio Campus III, Av. Central S/N esquina Mundo Maya, Col. Mundo Maya, C.P. 24153, Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico. ⁽²⁾ Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Química, Calle 56 No. 4 Esq. Avenida Concordia, Col. Benito Juárez, C.P. 24180, Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico.

of the Raman effect, including the dual behavior of light (wave and particle) and the types of scattering (Rayleigh and Raman). It also details the components of a modern Raman system and presents several high-impact scientific and technological applications. Notable examples include the detection of food adulteration, crop monitoring in simulated lunar soils, early diagnosis of endometrial cancer through blood analysis, and non-destructive authentication of works of art through pigment analysis. Despite its advantages such as portability, precision, and real-time analysis capabilities, this technique faces challenges such as fluorescence interference, which can mask important signals from the substances being identified. However, advanced strategies have been developed to address this issue, such as fluorescence quenching and photobleaching, as well as specific techniques that, using multiple lasers or the addition of nanometric particles, amplify the Raman signal of a substance to facilitate its identification. In conclusion, Raman spectroscopy has become an indispensable tool across multiple disciplines, including medicine, art, agriculture, pharmaceuticals, forensics, and space exploration. Its ability to study matter in depth without destroying or altering it continually opens new possibilities for research and application.

Keywords

Raman spectroscopy, light, molecular composition, scientific applications, noninvasive identification.

Introducción

Imagina un instrumento capaz de revelar de qué está compuesto cualquier material con solo iluminarlo. ¿Un medicamento alterado? ¿Un cuadro de Van Gogh falso? ¿O incluso rastros de vida en un meteorito? Esto no es ciencia ficción, es el potencial real que tiene la espectroscopía Raman, una técnica que convierte la luz en un detective de la composición molecular de la materia.

Todo comienza con un fenómeno sorprendente descubierto en 1928 por dos científicos de apellidos Raman y Krishnan. Cuando la luz de un láser ilumina una sustancia, la mayoría de esta interactúa con la materia sin cambios, pero una pequeñísima fracción, alrededor de una de cada diez millones de partículas de luz, cambia de color al interactuar con las moléculas del material. Este leve cambio funciona como una huella digital luminosa, ya que es única para cada sustancia: cada molécula posee una firma vibracional única, parecida a una melodía

interna grabada en sus enlaces químicos, y el efecto que produce, denominado Raman, actúa como un traductor capaz de registrar estas oscilaciones y transformarlas en un espectro de colores, donde cada tonalidad revela la identidad de la sustancia estudiada (Raman & Krishnan, 1928).

La característica particular de esta técnica reside en su precisión y delicadeza. A diferencia de otros métodos, la espectroscopía Raman puede analizar muestras sin dañarlas, a través de envases transparentes o por debajo de capas en algunos objetos. Esto la convierte en una herramienta extremadamente versátil: los rovers de la NASA la usan para buscar rastros de vida en las rocas marcianas (Fries et al., 2022); los médicos la emplean para detectar células cancerosas en etapas tempranas (Khristoforova et al., 2023); y los conservadores de arte descubren fraudes en pinturas famosas sin alterar ni una pincelada (Candeias & Madariaga, 2019; Manfriani et al., 2022).

En este artículo exploraremos cómo la técnica de espectroscopía Raman, que es parecida a un superpoder científico, transforma un simple haz de luz en información de la composición de las sustancias. Abordaremos de manera sencilla y entretenida la física que hay detrás del efecto Raman, cómo funcionan los dispositivos que lo hacen posible, y sus aplicaciones más asombrosas en la vida cotidiana, como la exploración espacial y la medicina. También hablaremos de los desafíos a los que se enfrenta, como la fluorescencia, que es su principal enemiga, y cómo los científicos logran superarlos.

¿Qué es la luz?

La luz es una forma de energía fascinante que viaja a través del espacio y nos permite ver el mundo. Pero lo más sorprendente de su naturaleza es que se comporta como una onda y como una partícula al mismo tiempo. Esta dualidad desconcertó a los científicos durante siglos. A veces actúa como diminutos paquetes de energía llamados fotones, y otras veces como ondas invisibles que se propagan como las olas en el agua. ¿Cómo puede ser ambas cosas a la vez? Esa es una de las maravillas más profundas de la física de la luz.

Uno de los primeros en explorar la naturaleza de la luz fue Isaac Newton, quien a principios del siglo XVIII propuso que estaba hecha de corpúsculos (pequeñas partículas) viajando en línea recta. Utilizando un prisma, mostró que la luz blanca en realidad está compuesta por todos los colores del

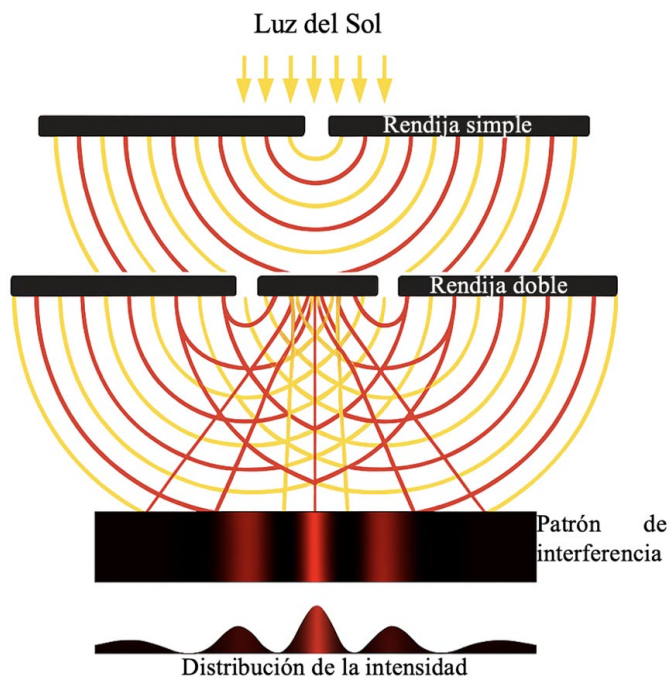
arcoíris. Para Newton, el color era el resultado de diferentes tipos de partículas de luz (Mills, 1981).

El interés por la descomposición de la luz continuó durante los siglos siguientes, el químico Robert Bunsen observó que distintos elementos, al ser excitados en la llama de un mechero, emitían colores característicos. A diferencia del espectro continuo de la luz blanca, estos espectros eran discretos y únicos para cada elemento. Este descubrimiento permitió desarrollar la espectroscopía óptica, una herramienta fundamental para analizar la composición de la materia (Aguilar et al. 2002).

El científico Thomas Young propuso una idea revolucionaria: que la luz era en realidad una onda.

Para demostrarlo, realizó un experimento sencillo pero genial, el cual consistió en hacer pasar un rayo de luz por dos rendijas muy cercanas, como se observa en la Figura 1. Si la luz fuera solo una partícula, lo que se esperaría es ver dos manchas brillantes por debajo de las aberturas, pero lo que apareció fue un patrón de franjas claras y oscuras, esto sucede porque, al pasar por las dos rendijas, la luz se comporta como una onda, es decir, las ondas que coinciden se suman y forman franjas brillantes (interferencia constructiva), y las que se cancelan forman zonas oscuras (interferencia destructiva), como cuando dos ondas en la superficie del agua se cruzan. ¡Era la interferencia de ondas de luz! Esto probaba que la luz tenía un comportamiento ondulatorio (Young Thomas, 1802).

Figura 1. Esquema del experimento de Young.



Young también explicó que cada color es como una "nota" en una sinfonía luminosa, en la que las ondas más cortas corresponden a colores como el azul y el violeta, mientras que las más largas dan lugar al rojo y el amarillo. Al igual que las cuerdas de una guitarra generan sonido al vibrar, la luz puede entenderse como una vibración que se propaga a través de un medio; estas oscilaciones alcanzan nuestros ojos y nos permiten percibir la luz.

Este comportamiento ondulatorio de la luz explica maravillas cotidianas y cósmicas: el brillo iridiscente de las burbujas de jabón, donde el azul aparece en

capas más delgadas que el rojo; la formación del arcoíris; o el hecho de que la luz se curve y difracte al pasar por objetos pequeños.

La interacción de la luz y la materia

La luz interactúa con la materia de distintas formas. Por ejemplo, puede ser absorbida y su energía excitar a los átomos o moléculas, elevándolos a estados energéticos superiores, luego, al emitirse, esa energía puede liberarse nuevamente como luz, en fenómenos como la fluorescencia o la fosforescencia, fenómeno que seguramente has observado en la ropa

blanca brillando bajo la luz ultravioleta. Además, la luz también puede dispersarse, es decir, cambiar de dirección al chocar con partículas o moléculas. Esta dispersión puede no alterar la energía de la luz, como cuando se observa un cielo azul (dispersión de Rayleigh), o sí modificarla ligeramente, como ocurre en la dispersión Raman, que se produce cuando los fotones interactúan con moléculas y pierden o ganan energía, cambiando ligeramente su frecuencia, o en términos prácticos cambian su color, revelando la identidad de moléculas, fenómeno que es la base de diversas técnicas espectroscópicas avanzadas. A pesar de que la dispersión Raman es un fenómeno energéticamente débil, es muy útil para identificar sustancias (Björn, 2015).

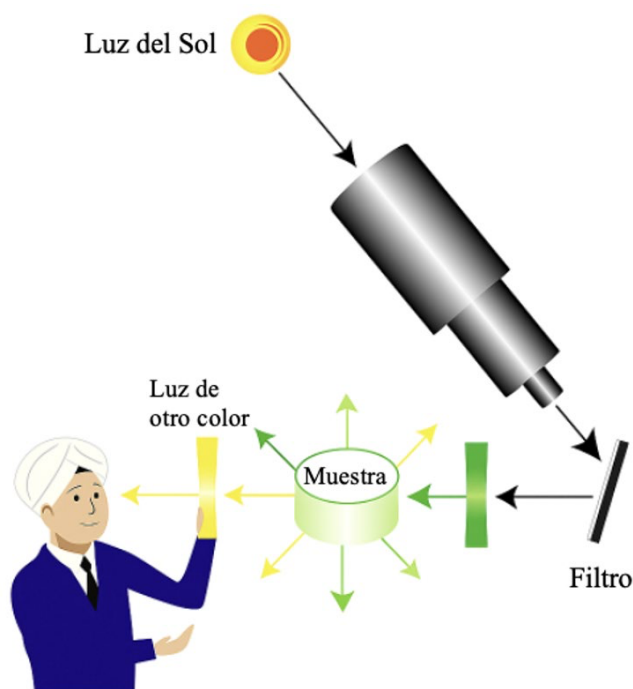
El efecto Raman: un susurro de luz

El efecto Raman fue descubierto en 1928 por el físico indio Chandrasekhara Venkata Raman, quien

recibió el Premio Nobel de Física en 1930 por tan importante hallazgo. Su descubrimiento abrió las puertas a una forma no invasiva de estudiar la materia a nivel molecular.

En la Figura 2 se muestra el experimento que reveló este fenómeno, en el que Raman concentró luz solar mediante un interesante sistema de lentes para enfocarla intensamente sobre muestras líquidas purificadas, o sus vapores, libres de polvo. Para detectar la débil señal de luz modificada, es decir, aquella que cambiaba ligeramente de color al interactuar con la materia, se empleó un ingenioso sistema de filtros. Uno bloqueaba la luz original de colores azul-violeta, y otro permitía pasar solo la luz de colores amarillo-verde, facilitando así la observación de una nueva radiación dispersada, diferente de la luz inicial. Este sutil cambio de color fue confirmado en unas 60 sustancias distintas.

Figura 2. Esquema del experimento de Raman.



La señal de la luz emitida del efecto Raman se distinguía por su baja intensidad, fuerte polarización y por no presentar decaimiento rápido, lo que permitía descartar que se tratara del fenómeno de fluorescencia. Incluso en vapores densos, como el del éter, aunque más difícil de observar, esta sorprendente característica seguía presente: era una clara evidencia de que las moléculas estaban alterando la luz al interactuar

con ella (Raman & Krishnan, 1928).

La física detrás de la espectroscopía Raman

El descubrimiento del fenómeno Raman dio origen a una poderosa herramienta de análisis: la espectroscopía Raman. Esta técnica, no destructiva y altamente sensible, permite “ver” la estructura molecular de una sustancia sin

tocarla o dañarla, únicamente usando luz. Lo hace detectando vibraciones, rotaciones y otras pequeñas transiciones de energía dentro de las moléculas.

¿Cómo funciona? Se basa en el fenómeno óptico antes mencionado como dispersión Raman, el cual ocurre cuando una luz de un solo color (monocromática), generalmente proveniente de un láser, interactúa con las moléculas de una muestra. Durante esta interacción, la mayoría de las partículas de luz, es decir, los fotones, rebotan sin cambiar su energía, lo que se conoce como dispersión de Rayleigh, pero una pequeñísima fracción de fotones sí cambia de color, proceso conocido como dispersión inelástica: este intercambio revela vibraciones internas únicas para cada sustancia (Kotadiya, 2024).

En la Figura 3 es posible observar que, dependiendo de si los fotones pierden o ganan un poquito de energía al chocar con las moléculas, hablamos de dos tipos de señales: Stokes, cuando pierden energía, y anti-Stokes, cuando la ganan. La diferencia entre el color original de la luz y el nuevo color nos da una medida muy precisa, llamada desplazamiento Raman, que funciona como una especie de código único de cada sustancia. Aunque esta señal es extremadamente débil, apenas una parte entre diez mil millones de la luz que entra, contiene información única de la sustancia analizada. Así, el espectro Raman actúa como una “huella digital molecular”, permitiendo identificar materiales de forma muy precisa, como se ejemplifica en la Figura 4 (Hickstein et al., 2018; Miklos et al., 2017).

Figura 3. Efectos de la interacción de la luz con la materia.

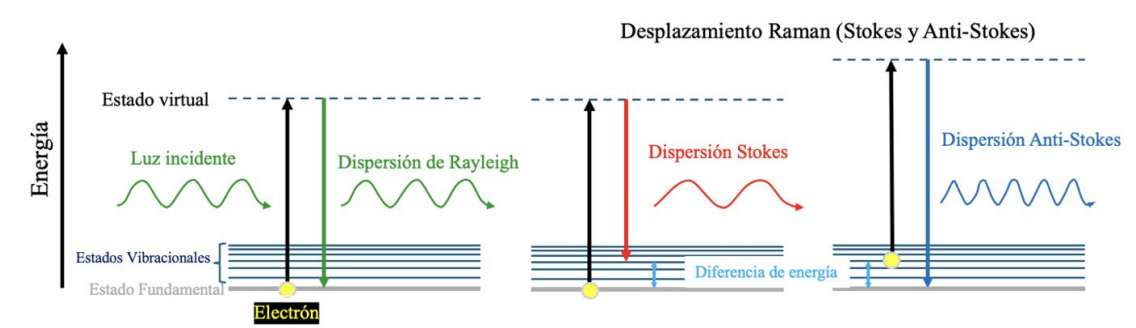
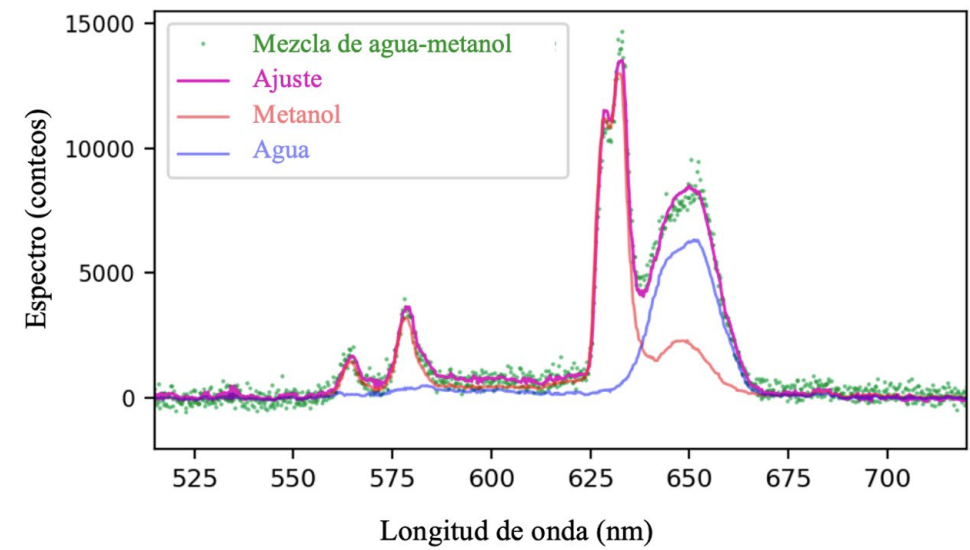


Figura 4. Espectros Raman para muestras de metanol puro, agua pura y una mezcla de agua y metanol. Los distintos picos del espectro de metanol pueden asignarse a diversas transiciones vibracionales (modificado de Hickstein et al., 2018).



Aplicaciones sorprendentes de la espectroscopía Raman

Ya vimos que la espectroscopía Raman es como un “escáner molecular” que permite identificar de qué está hecho un material con solo iluminarlo con un láser. Esta técnica se ha convertido en una herramienta poderosa en muchas áreas: en medicina, permite detectar enfermedades analizando tejidos sin necesidad de cirugía (Schiemer et al., 2025); en la industria alimentaria, ayuda a verificar si un producto está contaminado o cuenta con residuos de pesticidas (Naik & Mishra, 2023); en farmacología, se usa para controlar la calidad de los medicamentos (Santana et al., 2020); en arqueología y arte, para estudiar materiales antiguos sin dañarlos, así como verificar su autenticidad (Chaplin & Clark, 2016); y en exploración espacial, para analizar rocas o buscar señales de vida (Fries et al., 2022). Gracias a su rapidez, precisión y portabilidad, la espectroscopía Raman está revolucionando la forma en que estudiamos el mundo que nos rodea e ¡incluso más allá! A continuación, veremos algunos ejemplos fascinantes de sus aplicaciones.

Espectroscopía Raman: contribuyendo a la sostenibilidad alimentaria

¿Se puede conocer de dónde proviene el aceite que utilizas en tus alimentos? ¿O si estos proceden de una cadena de suministro sostenible? Un grupo de científicos demostró que sí, usando espectroscopía Raman portátil, una técnica que permite analizar sustancias sin abrir frascos ni destruir muestras. Aplicaron esta herramienta para investigar aceites de palma provenientes de África Occidental, con el objetivo de identificar su lugar de origen (Stradling et al., 2025).

La clave estuvo en analizar el contenido de β -caroteno, el pigmento natural que da al aceite de palma su característico tono rojo-anaranjado. El análisis de este compuesto resultó clave, ya que, según el estudio, casi el 96 % de las diferencias entre las muestras se explicaban por las variaciones en la cantidad de β -caroteno. Gracias a esto, fue posible distinguir con gran precisión aceites de países como Ghana, Togo, Liberia, Sierra Leona y Costa de Marfil.

Pero los hallazgos van más allá: también podrían ayudar a detectar malas prácticas de los proveedores, como adulteramiento de aceites o su mal etiquetado, y a vigilar la deforestación ilegal, ya que se ha observado que el aceite

proveniente de zonas deforestadas suele tener menos β -caroteno. Así, con solo un escáner láser y sin dañar el producto, esta técnica contribuye a hacer más transparente y sostenible la cadena de suministro del aceite de palma.

Cultivos de plantas en otros planetas

¿Cómo saber si una planta está sufriendo... en la Luna? En un estudio científico reciente se pudo detectar si una planta está estresada en ambientes extremos, como el espacio o suelos lunares simulados (Rodríguez et al., 2025). Se utilizó una planta cultivada en condiciones de gravedad cero, en un suelo parecido al de la Luna. ¿Qué encontraron? Signos claros de estrés oxidativo, es decir, desgaste celular: aumento de fenilpropanoides (una especie de defensa vegetal), disminución de carotenoides, pigmentos clave para la fotosíntesis y cambios en componentes estructurales como pectina y celulosa. Pero eso no es todo: también probaron si las plantas podían recuperarse usando antioxidantes naturales como glutatión, vitamina C y prolina. ¡Y funcionó! La señal Raman mostró que estos compuestos ayudaron a reducir el estrés y a normalizar las moléculas afectadas, especialmente en suelos que imitan a las zonas denominadas Mare y Highlands en la luna, que corresponden con llanuras oscuras y zonas montañosas, respectivamente. La importancia de este estudio radica en que no podemos llevar laboratorios enteros a otros planetas, y saber si las plantas están sanas es crucial para las futuras colonias en la Luna o Marte. Con la espectroscopía Raman, los astronautas podrían monitorear cultivos en tiempo real, sin dañar las plantas y con solo un escáner portátil.

Vanguardia en medicina: detección sin bisturí

Un equipo de científicos ha comprobado que las técnicas de espectroscopía ATR-FTIR y Raman pueden convertirse en métodos rápidos e indoloros para identificar cáncer de útero. Al examinar gotas de sangre de 54 mujeres (22 con la enfermedad y 32 sanas) descubrieron que, al usar Raman en plasma fresco, podían acertar un 82 % de las veces, mientras que ATR-FTIR alcanzaba un 78 %. Cuando combinaban ambas técnicas, la precisión subía al 86 %, nivel comparable al 83 % logrado con ATR-FTIR sobre plasma seco.

Cada tecnología detecta diferentes huellas químicas: ATR-FTIR resalta cambios en grasas y proteínas, y Raman apunta a ácidos nucleicos y colágeno. Además, notaron que estas señales

espectrales se parecen a las observadas en el síndrome de ovario poliquístico, lo que abre nuevas puertas para entender mejor ambas afecciones. Aunque hacen falta más estudios, estos resultados muestran que la espectroscopia es una herramienta sencilla, rápida y no invasiva para diagnosticar temprano el cáncer endometrial (Schiemer et al., 2025).

Descubriendo obras de arte falsas con espectroscopia Raman

La microscopia Raman demostró su enorme potencial en un caso sorprendente: un estudio de autenticidad de la pintura *Nude Woman Reclining*, atribuida a Marc Chagall y vendida por 100 000 libras esterlinas. Aunque se aseguraba que la obra era de 1910, el análisis reveló pigmentos sintéticos azul y verde que no existían antes de 1935 y 1938, incluso en la firma (Chaplin & Clark, 2016). Este hecho permitió al Comité Chagall en Francia declarar la falsificación y activar la normativa que obliga a destruir las piezas fraudulentas.

Desafortunadamente, la eliminación de la pintura supondría la pérdida irreversible de información forense que podría haber revelado técnicas de falsificación u orígenes de los materiales, muy útil para futuros estudios de autenticidad. Además, este caso subraya con fuerza la necesidad de que galerías y casas de subastas adopten rutinariamente análisis de autenticidad con técnicas científicas, como la microscopia Raman en pigmentos, antes de poner una obra en el mercado. ¡Y no es para menos! Una obra auténtica de Chagall, *Les Amoureux*, se subastó hace unos años por 28.5 millones de dólares.

Detectando microplásticos en agua sin necesidad de filtrado

En el creciente esfuerzo por enfrentar la contaminación por plásticos, un estudio ha demostrado el poder de la espectroscopia Raman para cuantificar microplásticos directamente en muestras líquidas, sin necesidad de filtrado ni preparación previa, como ocurre en otras técnicas recientes (Jung et al., 2024). A diferencia de otros métodos más complicados, esta técnica ilumina el líquido con un láser y capta señales únicas que emiten distintos tipos de plástico y que son muy diferentes a las señales características del agua, permitiendo establecer una relación precisa y confiable entre los materiales presentes en el agua, como polietileno y el PVC, dos tipos de plásticos muy comunes en la vida diaria.

Gracias a modelos muy precisos, esta técnica logró detectar concentraciones muy pequeñas, entre 0.1 y 1% en peso, con errores mínimos. Además, tiene una ventaja clave sobre otros métodos, como la espectroscopia infrarroja (FT-IR), y es que no se ve afectada por el agua, que suele interferir en este tipo de análisis. Esto la convierte en una herramienta ideal para monitorear microplásticos directamente en ríos, lagos o sistemas de agua potable, ayudando a vigilar la salud ambiental en tiempo real y de forma más sencilla.

Como hemos visto en los ejemplos anteriores, la espectroscopia Raman ofrece una serie de ventajas que la hacen destacar entre las herramientas científicas modernas. Permite analizar la composición química de casi cualquier material sin necesidad de prepararlo, tocarlo o destruirlo, lo que es ideal para muestras frágiles o valiosas, como tejidos humanos, alimentos, medicamentos, obras de arte o incluso rocas extraterrestres. Además, es una técnica rápida, precisa y portátil, lo que significa que se puede usar fuera del laboratorio, en hospitales, sitios arqueológicos, centros de producción o misiones espaciales. Gracias a su versatilidad y facilidad de uso, la espectroscopia Raman se ha convertido en una aliada fundamental para explorar, cuidar y entender mejor tanto nuestro planeta como el universo.

Limitaciones de la técnica y cómo superarlas

Aunque la espectroscopia Raman es una técnica poderosa, no todo es perfecto. Uno de sus principales obstáculos es la interferencia de la fluorescencia, un tipo de brillo intenso que emiten algunas sustancias al ser iluminadas. Este resplandor puede ser miles de veces más fuerte que la señal Raman que se desea observar, y termina por esconder la información importante, especialmente en materiales orgánicos o muestras biológicas, lo que impide que los materiales puedan ser identificados de manera certera.

¿Por qué ocurre esto? Porque ciertas sustancias emiten luz de manera muy intensa cuando se excitan con láseres en regiones del ultravioleta, visible o infrarrojo cercano. Además, factores como la pérdida natural de intensidad por la llamada Ley de Rayleigh, la falta de resonancia (amplificación de la señal) con la luz utilizada o la mezcla de señales, lo que dificulta aún más el análisis (Hug et al., 2020). Aunque hay técnicas para reducir este problema, como separar

las señales en el tiempo (espectroscopía con detección temporal), estas soluciones no siempre eliminan del todo la fluorescencia, y requieren equipos muy sensibles y avanzados para obtener buenos resultados (Wang & Fang, 2024).

Afortunadamente, los científicos han desarrollado varias estrategias para combatir este efecto no deseado. Algunas de ellas incluyen enfriar la muestra, usar láseres especiales para eliminar la fluorescencia (fotoblanqueo), o incluso emplear dos longitudes de onda distintas para anularla mediante un método llamado doble excitación diferencial. Estas soluciones han mejorado notablemente la calidad de los espectros Raman, permitiendo identificar mejor las sustancias sin perder resolución ni precisión(Cai et al., 2011).

La Tabla 1 resume algunas de las distintas variantes de espectroscopía Raman, en la que se muestra no solo cómo amplifican la señal y mejoran la resolución espacial o temporal, sino que también ofrecen soluciones específicas frente

a las limitaciones impuestas por la fluorescencia. Por ejemplo, técnicas como SERS, siglas en inglés de dispersión Raman mejorada por superficie, y TERS (Raman de campo cercano) logran amplificar la señal tanto, que esta sobresale del brillo interferente de la fluorescencia, lo que permite detectar incluso cantidades muy pequeñas de sustancias (John & George, 2017; Kotadiya, 2024), mientras que métodos como SRS (dispersión Raman estimulada) y CARS (dispersión Anti-Stokes coherente) evitan interferencias mediante procesos ópticos que suman señales lo que genera información más limpia y específica (Kotadiya, 2024; Marzi et al., 2017).

Los avances tecnológicos impulsados por mejoras en óptica, nanofabricación y técnicas computacionales, permiten a la espectroscopía Raman mantener su relevancia como herramienta clave en el análisis molecular, incluso en escenarios difíciles donde antes no era posible aplicarla con éxito.

Tabla 1. Variantes de la técnica de espectroscopía Raman y sus aplicaciones (John & George, 2017; Kotadiya, 2024; Marzi et al., 2017).

Tipo de Espectroscopía Raman	Mecanismo / Fundamento	Amplificación / Resolución	Aplicaciones Clave
Raman Espontáneo	Dispersión inelástica de luz monocromática (Stokes / anti-Stokes).	Señal débil.	Análisis no invasivo de biomateriales y tejidos.
SERS (Surface-Enhanced Raman Scattering)	Nanopartículas metálicas (Au, Ag) + plasmones localizados.	Aumento de señal en varios órdenes de magnitud.	Detección de ADN, proteínas, cáncer.
SHINERS (variante de SERS)	Nanopartículas recubiertas con capa aislante.	Mayor especificidad; menos interferencias.	Análisis sensibles en medios complejos.
Raman Resonante (RRS)	Coincidencia entre láser y transición electrónica del analito.	Amplificación de señal en varios órdenes de magnitud.	Estructura de proteínas, cromóforos.
SRS (Stimulated Raman Scattering)	Dos láseres generan señal coherente (ganancia Stokes / pérdida bomba).	Mayor velocidad e imagen sin fondo fluorescente.	Imágenes celulares en vivo.
CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering)	Proceso no lineal con tres láseres (bombeo, Stokes, sonda).	Suma de señales debido a varios láseres.	Imágenes 3D, lípidos, metabolismo celular.
TERS (Tip-Enhanced Raman Spectroscopy)	Microscopía AFM/STM con punta metálica para campo localizado.	Resolución nanométrica (< 10 nm).	Análisis químico de superficies a nanoescala.
Microscopía Confocal Raman	Rechazo óptico fuera de foco mediante pinhole.	Mejora de resolución espacial y profundidad.	Diagnóstico oncológico, farmacocinética in vivo.

Nota: un nanómetro equivale a $1 \times 10^{-9} \text{ m}$, un tamaño tan pequeño que ni siquiera es posible ver partículas en esta escala con los microscopios comunes.

Conclusiones

La espectroscopía Raman, desde su descubrimiento hace casi un siglo, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta versátil y poderosa para analizar la materia en contextos complejos. Su gran valor reside en revelar la composición molecular de sustancias sin contacto, preparación previa o destrucción de la muestra, superando así las limitaciones de otras técnicas en campos disciplinares en los que resultaría invasivo o un proceso lento.

Su extraordinaria adaptabilidad permite su uso desde laboratorios hasta ambientes extremos (como el espacio), demostrando eficacia, precisión y portabilidad. Sus aplicaciones cruciales abarcan la detección temprana de enfermedades, autenticación de bienes culturales, monitoreo ambiental y agrícola, control industrial y exploración planetaria. Más allá de identificar sustancias, permite monitorear procesos dinámicos, detectar estrés biológico y caracterizar nuevos materiales con gran precisión.

Aunque enfrenta desafíos técnicos, como la interferencia por fluorescencia, esto ha impulsado el desarrollo de estrategias innovadoras que mejoran la calidad y confiabilidad de los resultados de la técnica, expandiendo sus aplicaciones.

En resumen, la espectroscopía Raman ejemplifica cómo un principio físico sutil, con el desarrollo tecnológico adecuado, se transforma en una herramienta de impacto profundo y transversal en ciencia, industria, medicina y exploración espacial. Su capacidad para revelar la "voz oculta" de las moléculas seguirá siendo clave para los descubrimientos presentes y futuros.

Referencias

- Aguilar Sahagún, G., Cruz Jiménez, S., & Flores Valdés, J. (2002). *Una ojeada a la materia* (3ª ed.). Fondo de Cultura Económica; SEP; CONACyT. ISBN: 9789681666408
- Björn, L. O. (2015). The nature of light and its interaction with matter. In *Photobiology: The Science of Light and Life*, Third Edition (pp. 1–20). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1468-5_1
- Cai, Z., Zou, W., & Wu, J. (2011). A dual-excitation difference technique for fluorescence rejection in Raman spectroscopy. *International Symposium on Bioelectronics and Bioinformatics* 2011, 29–32. <https://doi.org/10.1109/ISBB.2011.6107637>
- Candeias, A., & Madariaga, J. M. (2019). Applications of Raman spectroscopy in art and archaeology. In *Journal of Raman Spectroscopy* (Vol. 50, Issue 2, pp. 137–142). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/jrs.5571>
- Chaplin, T. D., & Clark, R. J. H. (2016). Identification by Raman microscopy of anachronistic pigments on a purported Chagall nude: conservation consequences. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 122(3), 1–5. <https://doi.org/10.1007/S00339-016-9644-3/FIGURES/2>
- Fries, M. D., Lee, C., Bhartia, R., Razzell Hollis, J., Beegle, L. W., Uckert, K., Graff, T. G., Abbey, W., Bailey, Z., Berger, E. L., Burton, A. S., Callaway, M. J., Cardarelli, E. L., Davis, K. N., DeFlores, L., Edgett, K. S., Fox, A. C., Garrison, D. H., Haney, N. C., ... Aileen Yingst, R. (2022). The SHERLOC Calibration Target on the Mars 2020 Perseverance Rover: Design, Operations, Outreach, and Future Human Exploration Functions. *Space Science Reviews*, 218(6). <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00907-1>
- Hickstein, D. D., Goldfarbmuren, R., Darrah, J., Erickson, L., & Johnson, L. A. (2018). A Raman-spectroscopy-based sensor for rapid, accurate, and precise concentration measurements of a methanol-water mixture. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.06404>
- Hug, W. F., Nguyen, Q., Reid, M., Sijapati, K., & Reid, R. D. (2020). Deep UV Raman and fluorescence spectroscopy for real-time in situ process monitoring. In L. T. M. Profeta, A. K. Azad, & S. M. Barnett (Eds.), *Next-Generation Spectroscopic Technologies XIII* (Vol. 11390, p. 113900X). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2556653>
- John, N., & George, S. (2017). Raman Spectroscopy. In *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization* (Vol. 2, pp. 95–127). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46140-5.00005-4>
- Jung, E. S., Choe, J. H., Kim, J. S., Ahn, D. W., Yoo, J. U., Choi, T. M., & Pyo, S. G. (2024). Quantitative Raman analysis of microplastics in water using peak area ratios for concentration determination. *Npj Clean Water*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00397-4>
- Khristoforova, Y., Bratchenko, L., & Bratchenko, I. (2023). Raman-Based Techniques in Medical Applications for Diagnostic Tasks: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 15605. <https://doi.org/10.3390/IJMS242115605>
- Kotadiya, M. C. (2024). *Organic Spectroscopy Technology and Applications*.
- Manfrian, C., Zuen, M., Ruggiero, L., Lucarelli, C., Ridolfi, S., Tortora, L., & Sodo, A. (2022). The forger's identikit: A multi-technique characterization of Pippo Oriani's fake paintings. *Dyes and Pigments*, 207, 110755. <https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2022.110755>

Julio - Diciembre

- Marzi, J., Brauchle, E., Carvajal Berrio, D. A., Lee Layland, S., & Schenke-Layland, K. (2017). Raman spectroscopy. In *Comprehensive Biomaterials II* (pp. 108–127). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09323-1>
- Miklos, R., Berhe, D. T., & Lametsch, R. (2017). Chapter 14 - X-ray Contrast Tomography and Raman Spectroscopy Methods Show Heat-Induced Changes in Meat. In P. P. Purslow (Ed.), *New Aspects of Meat Quality* (pp. 373–385). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100593-4.00015-1>
- Mills, A. (1981). Newton's prisms and his experiments on the spectrum. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 36(1), 13–36. <https://doi.org/10.1098/rsnr.1981.0002>
- Naik, S., & Mishra, M. (2023). Chapter four - Raman spectroscopy combined with multivariate analysis in quality analysis of food and pharmaceutical materials. In A. K. Shukla (Ed.), *Food Quality Analysis* (pp. 97–118). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95988-9.00002-3>
- Raman CV, & Krishnan KS. (1928). A new type of secondary radiation. *Nature*, 121, 501.
- Rodriguez, A., Barcenilla, B. B., Hall, E., Kundel, I., Meyers, A., Wyatt, S., Shippen, D., & Kurouski, D. (2025). Raman spectroscopy as a tool for assessing plant growth in space and on lunar regolith simulants. *Npj Microgravity*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41526-025-00479-8>
- Santana, J., Löbenberg, R., & Bou-Chacra, N. A. (2020). Raman spectroscopy for quantitative analysis in the pharmaceutical industry. *Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 23(1), 24–46. <https://doi.org/10.18433/jpps30649>
- Schiemer, R., Grant, J., Shafiee, M. N., Phang, S., Furniss, D., Boitor, R., Seddon, A. B., Notingham, I., Atiomo, W., Jones, N. W., & Gajjar, K. B. (2025). Infrared and Raman spectroscopy of blood plasma for rapid endometrial cancer detection: Clinical Studies. *British Journal of Cancer*. <https://doi.org/10.1038/s41416-025-03050-0>
- Stradling, J., Lima, C., Grosman, R., Barsukov, I., Xu, Y., Teye, E., Elliott, C., Muhamadali, H., & Goodacre, R. (2025). Raman on the palm: handheld Raman spectroscopy for enhanced traceability of palm oil. *Npj Science of Food*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00462-3>
- Wang, Z., & Fang, G. (2024). Sensitivity enhancement of time-gated Raman spectroscopy by reducing the systematic noise of residual fluorescence background. *Opt. Lett.*, 49(24), 7086–7089. <https://doi.org/10.1364/OL.540236>
- Young Thomas. (1802). The Bakerian Lecture. On the theory of light and colours. *Phil. Trans. R. Soc.*, 92, 12–48.

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2025.**Fecha de aceptación: 8 de noviembre de 2025.**

Análisis de datos de sensores: develando secretos ocultos en microfisuras y otros tipos de fallas

Romero Sotelo Francisco Javier⁽¹⁾
Rodríguez Blanco Marco Antonio⁽¹⁾
Pérez Montejó Salatiel⁽¹⁾
García Sigales Bryand⁽¹⁾

RESUMEN

Este trabajo tiene como propósito analizar y explicar los datos adquiridos por sensores para la detección temprana de microfisuras y fallas estructurales en materiales y sistemas mecánicos. Se implementó una metodología basada en el procesamiento de señales de sensores de vibración, ultrasonido y emisión acústica, aplicando algoritmos de extracción de características y técnicas de aprendizaje automático para identificar patrones anómalos. Las señales fueron preprocesadas mediante filtrado digital y transformadas a dominios de frecuencia y tiempo-frecuencia para un estudio más detallado. Los resultados demuestran que es posible detectar microfisuras incipientes con precisión alta antes de la aparición de síntomas visibles o funcionales y también los latidos del corazón con un algoritmo en Matlab. Este enfoque favorece el mantenimiento predictivo y mejora la seguridad operativa de sistemas industriales y estructurales, a su vez monitorear el estado de salud de una persona. Se concluye que el análisis avanzado de datos de sensores permite evaluar la integridad estructural de manera más eficiente, al tiempo que reduce los costos derivados de fallas imprevistas.

ABSTRACT

This work is to analyze and explain the data acquired by sensors for the early detection of microcracks and structural failures in materials and mechanical systems. A methodology based on the processing of signals from vibration, ultrasound and acoustic emission sensors was implemented, applying feature extraction algorithms and machine learning techniques to identify anomalous patterns. The signals were pre-processed using digital filtering and transformed into frequency and time-frequency domains for further study. The results demonstrate that it is possible to detect incipient microcracks with high accuracy before the onset of visible or functional symptoms and heartbeats with an algorithm in Matlab. This approach favors predictive maintenance and improves the operational safety of industrial and structural systems, while monitoring a person's health status. It is concluded that advanced analysis of sensor data allows structural integrity to be evaluated more efficiently, while reducing costs derived from unforeseen failures.

Palabras clave

análisis de señales, sensores, microfisuras, mantenimiento predictivo, detección de fallas.

Keywords

signal analysis, sensors, micro-cracks, predictive maintenance, fault detection.

⁽¹⁾ Profesores Investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche, Av. Central S/N con Fracc. Mundo Maya CP. 24115.

Introducción

La manera en que encontramos fallos en máquinas y estructuras se está transformando gracias a los sensores de vibración. Estos aparatos “oyen” las vibraciones de un equipo o estructura. Con estos datos pueden identificar fallos comunes, como una pieza desalineada o desgastada, y fallos invisibles, como las microfisuras. Y aunque esas grietas sean pequeñas, con el tiempo pueden generar daños severos y comprometer la seguridad (Ceravolo et al., 2017).

Analogía para la detección de microfisuras: Detectar microfisuras con sensores es parecido a escuchar con un oído súper afinado las mínimas vibraciones de una pared aparentemente intacta, aunque estas grietas sean invisibles, generan señales muy sutiles que los sensores pueden captar para alertarnos antes de que el daño se haga visible o grave.

La premisa es simple: cuando algo falla, su "huella" vibracional se altera. Los sensores captan esos cambios y un software los interpreta para dar la alarma en caso de problemas, al reconocerlo nos permite anticiparnos y realizar un mantenimiento predictivo donde al anticiparnos a una falla permite programar y mejorar las reparaciones, evitar paradas inesperadas que disparan los costes y el riesgo de accidentes. En el ámbito de la salud, tanto pacientes como profesionales se benefician.

Por ejemplo, en bombas de infusión o ventiladores mecánicos, un rodamiento en mal estado genera vibraciones anormales. Al notarlo, el personal técnico puede sustituir la pieza antes de que el equipo se detenga. Igual con resonadores, tomógrafos y autoclaves: los sensores identifican fallas o fisuras en componentes sometidos a altas velocidades o presiones y previenen la interrupción de estudios o ciclos de esterilización. Los aires acondicionados en hospitales también aprovechan: un ruido raro puede significar correas sueltas o motores desgastados, lo cual comprometería la calidad del aire en áreas críticas (Autodiagnóstico de Fallas Con Sensores Inteligentes, 2023.).

La infraestructura pública como puentes de acero y viaductos también se vuelve más segura y duradera, el control de vibraciones permite detectar fallos en cables o en las placas que los sostienen. (Alvarez Q et al., 2022) Con esos datos, los equipos de mantenimiento determinan qué refuerzos o reparaciones deben priorizarse antes de que el daño empeore. El resultado: una infraestructura más fiable, menos cortes imprevistos y más rentabilidad,

porque se gasta en lo que más se necesita. En transporte y energía, la tecnología es un "sistema de alerta temprana".

Los trenes y metros detectan ruedas planas, motores desbalanceados o piezas en proceso de falla. Esto contribuye a disminuir demoras y deterioros en las vías. En los aerogeneradores, los sensores en el eje o en la caja de engranajes captan desgastes iniciales y permiten programar las reparaciones para cuando haya poco viento(Herrera, 2024).

En las centrales eléctricas se supervisan bombas y generadores para evitar paradas que cuestan millones y dejan a oscuras a miles de personas. La manufactura es otra área en la que esto se puede usar. En las líneas de producción, los sensores captan cuando los motores, bombas o compresores están desalineados, en vez de parar la planta en las horas pico, el cambio se programa en las horas muertas, con lo cual el efecto en la producción es mínimo(Torres, 2023).

Análisis de señales de vibración de los latidos del corazón: Una analogía, el análisis de las vibraciones del corazón mediante sensores es como colocar un micrófono muy sensible en el pecho que capta la música del latido cardíaco, de manera que se pueden identificar alteraciones en el ritmo o la fuerza, tal como un oído entrenado detecta si una melodía está desafinada.

En equipos grandes, como molinos o prensas, el análisis de vibraciones detecta el desgaste en ejes o rodamientos. Reemplazar una pieza a tiempo evita daños mayores, prolonga la vida útil del equipo y disminuye el desperdicio de materiales. Todo esto se debe a que los sensores son ahora más exactos, más pequeños y baratos, y pueden proporcionar información en tiempo real. A través de algoritmos de análisis y modelos predictivos, no solo detectan problemas en el momento, sino que también anticipan cuáles podrían surgir y cuándo sería el momento óptimo para intervenir.

De este modo, las empresas saben qué esperar de antemano, pueden planificar las piezas de repuesto, programar el trabajo de los técnicos y reducir las interrupciones. Además de ahorrar, se está haciendo un bien al planeta y a la sociedad. Identificar y corregir fallas en etapas tempranas permite evitar el derroche de materiales, evita cambios prematuros y reduce el consumo de energía por fallas mayores. Vela también por la seguridad de las personas (pacientes, personal de la salud, usuarios de puentes, ascensores, transporte, etc.). En suma, una estrategia

efectiva, sustentable y respetuosa de la vida.

En resumen, los sensores de vibración y el mantenimiento predictivo cambian la idea de "reparar cuando se rompe" a "prevenir usando datos". En salud, infraestructura, transporte, energía, manufactura, etc., esta tecnología ayuda a tomar mejores decisiones, intervenir a tiempo y tener sistemas más confiables. Es una herramienta silenciosa, pero poderosa. Está ahí, en la sombra, para que todo funcione mejor, con más seguridad.

La vibración constante se puede monitorear en el caso de fallas como microfisuras, fracturas o fracturas por fatiga y desgaste interno. Estos defectos, aunque invisibles, alteran las vibraciones del material lo que puede ser captado y analizado por los sensores. Detectar estos problemas antes que se conviertan en un problema mayor, permite realizar intervenciones tempranas que prevengan accidentes y tiempos de paro productivo. También, alargando la vida útil de las máquinas y estructuras y reduciendo los costos de reparación (López González, 2009)

Antecedentes

La evolución de los sensores y la adquisición de datos diagnósticos captura el desarrollo de la tecnología durante 1,900 años, una evolución verdaderamente fascinante. A lo largo de este tiempo, nuestra capacidad para detectar, medir y diagnosticar fallos en sistemas complejos ha sido transformada con los mismos dispositivos mecánicos en un nivel mucho más refinado que los sistemas inteligentes de la Industria 4.0 (López González, 2009).

El antecedente documentado más antiguo de un sensor para diagnóstico data del año 130 d.C. con la creación del primer sismógrafo por Chan-Heng en la antigua China. Este dispositivo primitivo era un vaso de bronce con seis bolas en equilibrio sobre las bocas de dragones. Cada vez que una de las bolas caía en la boca de uno de los animales, indicaba que había ocurrido una onda sísmica, estableciendo el principio fundamental de la detección automática de eventos (Historial de Los Sistemas de Adquisición de Datos, Dewesoft, 2025.).

A lo largo de los siglos, las civilizaciones comenzaron a elaborar herramientas de medición utilizando su cuerpo como modelo. Un ejemplo antiguo y llamativo son los egipcios, quienes durante la era de 3000 a.C. utilizaron una vara de granito como medida, tomando las dimensiones del faraón como referencia. Esto es conocido como el "código

real" (Revolucionando La Detección: La Evolución de La Tecnología de Sensores, Balluff, 2025.).

El termómetro moderno fue inventado en 1612 por Santorio en Italia, quien selló líquido dentro de un tubo de vidrio y observó su expansión con los cambios de temperatura. Esta innovación estableció el principio de transducción que convertiría fenómenos físicos en lecturas interpretables (Mejía et al., 2020).

En 1821, Thomas Johann Seebeck demostró que las uniones de dos metales diferentes generarían voltaje si los dos extremos estaban soldados y se calentaban a diferentes temperaturas, sentando las bases del efecto termoeléctrico. Esto fue de vital importancia para el posterior desarrollo de termopares industriales (Mejía et al., 2020).

Leopoldo Nobili desarrolló el primer termopar funcional en 1829, que permitió mediciones de temperatura precisas en aplicaciones industriales. Este avance marcó el comienzo de la era de los sensores electrotécnicos. El sismógrafo moderno fue inventado en 1842 por el físico escocés James David Forbes, quien creó un dispositivo que utilizaba un péndulo que permanecía estacionario debido a la inercia mientras todo lo que lo rodeaba se movía con un estilete que marcaba los movimientos en papel gráfico en tiempo real (Mejía et al., 2020).

El principio de desarrollo de sensores de precisión inicio durante el siglo XIX tardío, se diseñó el sensor de temperatura bimetálico que valorizaba la diferencia en expansión de dos placas metálicas unidas. A pesar de que la precisión estaba limitada a un rango de dos grados, estos sensores eran baratos y tuvieron muchas aplicaciones industriales.

En 1932 C.H. Meyers patentó dispositivos detectores de temperatura de resistencia (RTD). Este sensor consistía en medir la resistencia eléctrica de un hilo de platino, y fue considerado como el más confiable hasta el momento, creando estándares que se usan hasta hoy (Mejía et al., 2020).

La integración de sensores en sistemas automatizados ganó impulso en la década de 1950, mejorando la flexibilidad y la precisión en sistemas automatizados en numerosas aplicaciones industriales. Este período significó el cambio de mediciones manuales a monitoreo automatizado continuo.

El primer sensor de proximidad industrial se desarrolló en 1958, seguido por el primer sensor inteligente para aplicaciones aeroespaciales en 1969. Estos desarrollos sentaron las bases

fundamentales para el monitoreo automatizado de procesos industriales sofisticados(British Federal México, 2025.).

La integración de tecnología avanzada, inteligencia artificial y el mantenimiento predictivo industrial, como lo es el análisis por sensores para la detección de microfisuras y otros tipos de fallas, está transformando de manera revolucionaria el mantenimiento industrial y la seguridad estructural. Esta tecnología sinérgica hace posible no solo detectar problemas presentes, sino también predecir fallas con una exactitud superior al 95%, estableciendo un nuevo paradigma en la administración de bienes de gran valor.(Pérez Segura et al., 2025).

La implementación de tales tecnologías produce beneficios económicos medibles, incluyendo una mejora del 51% en el tiempo de actividad, una reducción del 11% en costos de mantenimiento y una disminución del 8% en riesgos de seguridad (Mantenimiento Predictivo y Sus Beneficios En La Industria, Cleverpy, 2025.). Estos resultados justifican ampliamente la inversión en sistemas de monitoreo predictivo, especialmente considerando que el costo del tiempo de inactividad puede superar los 300,000 dólares por hora para el 91% de las empresas (El Costo Del Tiempo de Inactividad: 21 Estadísticas Que Necesita Saber, 2025).

Tecnologías Emergentes y la Industria 4.0.

En la década de los años 2000, el empleo de sensores con integración de IoT que significa “Internet de las Cosas”, empezó a surgir, tal como se puede apreciar en la figura número 1 que presenta las tecnologías emergentes más relevantes en ese momento. Los sensores conectados de última generación tienen la capacidad de establecer una comunicación bidireccional tanto entre ellos como con un sofisticado sistema de gestión centralizado, lo cual posibilita la supervisión y el control remoto de los complejos procesos de producción en tiempo real, como se describe en el libro (La Historia de La Automatización Industrial: De La Producción Manual a La Máxima Eficiencia, 2025.). Los avanzados sensores inteligentes de última generación trascienden la simple medición de parámetros físicos elementales. Las inteligencias artificiales poseen capacidades avanzadas de procesamiento de datos y toma de decisiones autónoma, funcionando como un sofisticado "órgano sensorial" para los sistemas automatizados, lo cual les otorga la habilidad de ajustarse y reaccionar de manera eficaz ante situaciones variables y dinámicas (Avances Tecnológicos En Electrocardiografía, 2025.).

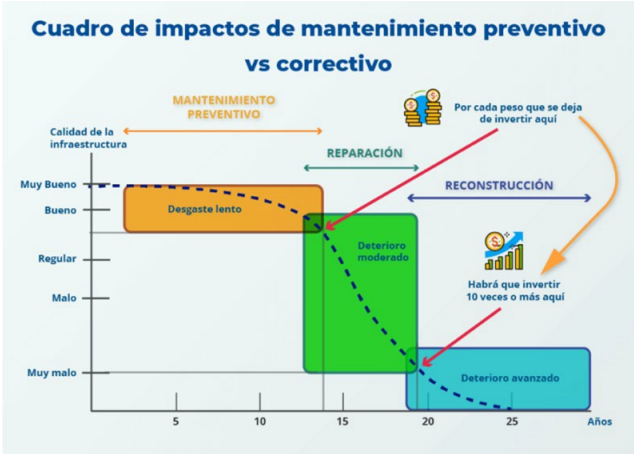
Figura 1. Tecnologías emergentes desarrolladas en la actualidad



El mantenimiento predictivo de sus siglas en Ingles (PdM-Predictive Maintenance) surge debido a la falta de efectividad del mantenimiento preventivo, por lo que surge entre 1960 y 1970. El enfoque del mantenimiento predictivo se basa en la supervisión de la condición actual del equipo a través de sensores con el objetivo de realizar un pronóstico preciso sobre la ocurrencia de fallas,

tendiendo también en consideración el impacto que tiene el mantenimiento predictivo con el correctivo que impacta en costos de reparación y deterioros del equipo más avanzados que se observan en la figura 2 (Sensores Inteligentes En La Industria 4.0: Optimización de La Producción Con Visión Artificial - Manufactura Noticias By Admin User - Blog Author, 2025.)

Figura 2. Mantenimiento preventivo contra correctivo, consecuencias económicas en el tiempo que se realice (Mantenimiento Correctivo y Preventivo de Infraestructuras, 2025.)



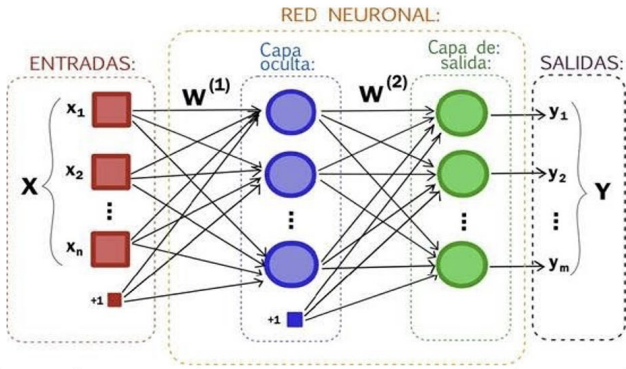
Los sistemas de mantenimiento predictivo más modernos permiten obtener beneficios económicos notables. Entre estos se encuentran: un incremento del 51% en el tiempo de disponibilidad, disminución del 11% en el costo de mantenimiento y un retorno de la inversión superior a diez veces el costo de implementación.

El reconocimiento automático de problemas de los sistemas de diagnóstico comenzó a utilizar más comúnmente IA y machine learning, junto con su implementación en 2010. Además, a partir de estos años, se mejoraron las detecciones

de problemas al incorporar algoritmos como Random Forest y Support Vector Machines (SVM), los cuales permiten trabajar con grandes volúmenes de datos y múltiples variables.

El análisis de imágenes para encontrar fallas en estructuras ha mejorado mucho. Se usan unas herramientas llamadas Redes Neuronales Convolucionales de sus siglas en Ingles (CNN), que combinan con el uso de drones. Esto permite revisar y detectar daños en lugares difíciles de alcanzar sin tener que llegar físicamente como se observa en la figura 3.

Figura 3. Una red neuronal que muestra las entradas, capas ocultas, y salidas (Deep Learning y Clasificación de Imágenes - IDECOR, 2019).



Sensores de Próxima Generación y Fabricas Inteligentes

Los sensores de hoy no requieren mantenimiento ni calibración durante al menos una década, funcionando con una sola batería. Las nuevas tecnologías incluyen:

- Sensores ultrasónicos: Permiten la detección de defectos internos como grietas, inclusiones y corrosión mediante ondas sonoras de alta frecuencia. Estos equipos proporcionan resultados en tiempo real gracias a que los transductores emiten ondas de alta frecuencia que reflejan errores de forma predecible, produciendo patrones de eco distintivos (Oroz Farfan & Zapaille Neyra, 2024).
- Sensores de fibra óptica inmunes a la actividad electromagnética y capaces de monitorear varios puntos a la vez (Detección de Grietas y Dimensionamiento (CDS) y Ondas Progresivas, Evident, 2025).
- Termografía infrarroja activada por ultrasonido para una detección precisa sin contacto (Leonardo Zambrano Salazar & Katherine Gamboa López, 2024).
- Los sensores MEMS son sensores miniaturizados que integran partes mecánicas y eléctricas en un solo chip. Estos sensores pueden detectar movimiento, vibración,

presión, temperatura, etc., y transformarlos en señales eléctricas que las máquinas pueden interpretar.

- Los sensores industriales se consideran los “nervios de la Industria 4.0”, pues posibilitan que las máquinas “sientan” el medio en el que operan y tomen decisiones de forma instantánea. La interconexión de sistemas mediante IoT ha cambiado radicalmente la operación de los sectores industriales, desde el monitoreo en remoto hasta la optimización de procesos.

La automatización robótica industrial sigue evolucionando, impulsada por la tecnología de detección que servirá de la base para la recopilación de datos que convertirá las plantas fabriles en fábricas del futuro: conectadas, económicas y confiables.

Microfisuras en ejes Rotodinámicos

Las microfisuras en ejes son pequeñas grietas o discontinuidades que pueden originarse por factores como fatiga como se observa en la figura 4, sobrecarga, corrosión, defectos de fabricación, vibraciones o fenómenos como el fretting corrosion. Aunque inicialmente microscópicas, estas microfisuras pueden crecer bajo cargas cíclicas o condiciones adversas, comprometiendo la integridad estructural del eje y provocando fallos catastróficos si no se detectan a tiempo.

Figura 4. Un eje que fallo por cargas cíclicas y muestra la formación de microfisuras y causas de rotura.



Metodología.

En esta sección se presenta una variedad de métodos para detectar fallas en equipos industriales y de uso común, así como de la importancia de analizar los datos de las señales de sensores obtenidas en el monitoreo. Se destacan métodos directos que permiten el acceso a las señales generadas por los sensores, lo cual facilita tanto el monitoreo como la verificación del cumplimiento dentro de rangos aceptables. Ejemplos de estos métodos incluyen la medición de temperatura en rodamientos y la evaluación de la potencia mecánica en la salida de motores. Estas técnicas, frecuentemente clasificadas como "pruebas de eficiencia", brindan una clara evaluación del estado operativo del componente, aunque tienen limitaciones, particularmente en lo que respecta al control remoto.

Para realizar un diagnóstico completo del estado de una máquina o estructura, se emplean diferentes tipos de mediciones que permiten observar cómo se comporta el equipo en funcionamiento. Una de las formas más efectivas de hacerlo es analizando las vibraciones y los sonidos que produce, ya que estos pueden revelar la presencia de daños internos o desgaste.

Las técnicas que se utilizan para extraer y analizar

estas señales se conocen como "pruebas no destructivas". Esto significa que se puede revisar el equipo sin dañarlo ni alterar su funcionamiento. Existen varios tipos de pruebas no destructivas, cada una con su propio método y utilidad. Entre las más comunes están el ultrasonido, que utiliza ondas sonoras para detectar defectos internos; los líquidos penetrantes, que ayudan a encontrar grietas superficiales; las partículas magnéticas, que revelan fallas cercanas a la superficie en materiales metálicos; la radiografía, que permite ver el interior de los componentes; el uso de geles o líquidos especiales para resaltar fisuras; la emisión acústica, que detecta sonidos generados por fracturas; y las corrientes de Eddy, que identifican cambios en la estructura metálica.

Estas pruebas son fundamentales no solo para verificar que los componentes de una instalación estén en buen estado, sino también para evaluar el desgaste, la fatiga y las deformaciones que pueden afectar la seguridad y el rendimiento de las estructuras. Gracias a ellas, es posible detectar microfisuras y otros tipos de fallas antes de que se conviertan en problemas graves, lo que ayuda a mantener la integridad y la confiabilidad de los equipos industriales. Se muestra el resumen de los métodos y su alcance en la detección de microfisuras y otras fallas en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de métodos para detección y diagnostico de fisuras y otras fallas.

Técnica	Superficiales	Subsuperficiales	Internas	Ventajas Principales
Inspección Visual	Sí	No	No	Rápida, económica
Líquidos Penetrantes	Sí	No	No	Alta sensibilidad superficial
Partículas Magnéticas	Sí	Sí	No	Detecta fisuras poco profundas
Corrientes Inducidas	Sí	Sí	No	Muy eficaz en metales conductores
Ultrasonido	No	Sí	Sí	Detecta defectos internos
Radiografía	No	Sí	Sí	Visualización interna detallada
Termografía Infrarroja	Sí	Sí	No	Inspección rápida, no contacto
Técnicas Acústicas	Sí	Sí	Sí	Complementarias, detalladas

Importancia del Análisis de Datos.

Uno de los objetivos por hacer análisis de los datos de los sensores es integrar esa información al ciclo de mantenimiento, optimizando el tiempo de detección de fallas o problemas dentro de la infraestructura. Aumentando exponencialmente el

volumen de un recurso informático, las empresas deben administrarlo, lo cual representa un reto en gestionarlo de manera efectiva. Esto es debido a la especialización que hay actualmente.

La administración del riesgo tiende a concentrarse en una línea de tiempo que acumula información

histórica de las fallas repetitivas. Contar con herramientas de análisis de datos en la actualidad posibilita su interpretación, por ejemplo, el tiempo entre fallas, fallas momentáneas o recambio de partes a lo largo del tiempo. Anteriormente, estas variables se trataban de forma individual, lo que no permitía identificar tendencias y antecedentes, logrando solo generar información reportada de manera general o bien, muy puntual.

Es necesario analizar holísticamente las razones que llevan a un sistema a alcanzar el límite de su Tiempo de Vida Útil debido al desgaste en las líneas de transporte o por daños que pueden ser multicausales. La identificación de fallas multicausales debería enfocarse más en el ajuste de las cantidades delimitantes de tiempo útil en un antes y después de uso, pues su estudio minucioso indica que la razón más frecuente de reinicio es la falta de aviso para el consumo o gasto que se debería realizar durante dicha condición.

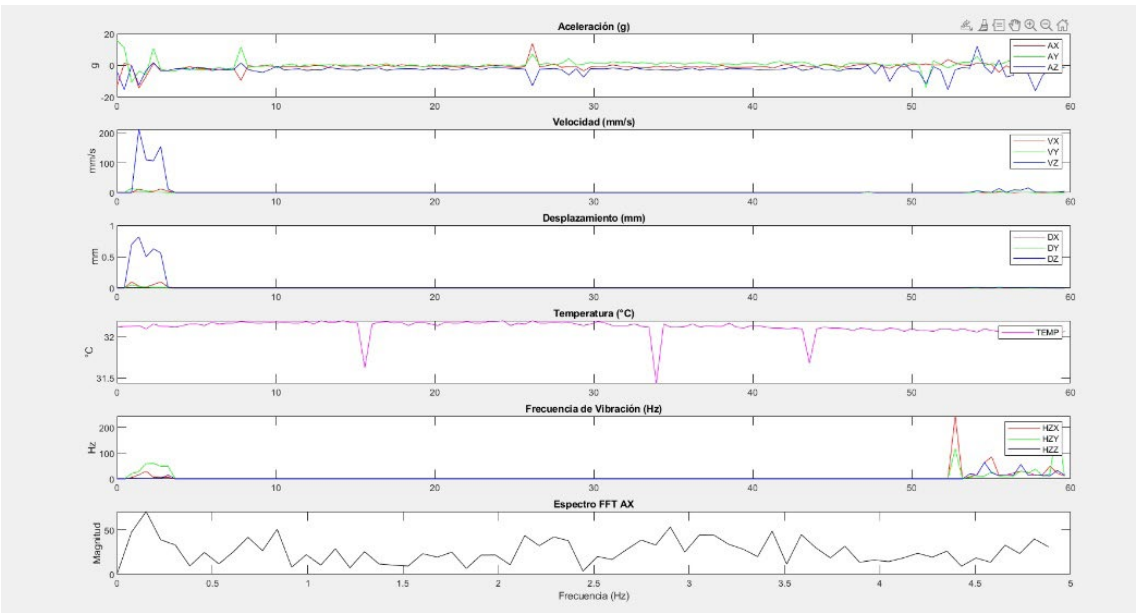
Tipos de sensores utilizados.

La sensorización en cualquier proceso consiste en obtener información precisa sobre su estado o el de sus componentes, siendo más efectivo cuando se logra medir desde dentro del propio proceso. Esto implica instalar sensores que permitan un monitoreo profundo. Diversos autores clasifican los sistemas de sensorización según el tipo de control, monitoreo

o el tipo de variable que se desea observar. En el monitoreo de estructuras, la información se obtiene a través de mediciones que permiten conocer el estado actual y anticipar posibles comportamientos futuros. Los sensores más comunes en este ámbito son los que miden presión, temperatura, inclinación, vibración, ultrasonido, esfuerzos y desplazamientos, conocidos como sensores geotécnicos.

1.Sensores de Vibración: Los sensores de vibración son utilizados para medir la aceleración, la velocidad, el desplazamiento, entre otros. Dependiendo del tipo de sensor, la lectura se proporciona como medición de pico a pico, RMS, pico, etcétera que se muestra en la figura 5, donde se creo un algoritmo que permite determinar lo anterior y adicional los espectros derivados de la FFT (Transformada rápida de Fourier). Los datos obtenidos de estas mediciones pueden ser procesados de manera que se obtengan otras mediciones distintas a las censadas, posteriormente se aborda el procesamiento. Dependiendo del sensor, este puede medir en tres ejes o en un solo eje. La frecuencia natural de un sensor puede alcanzar desde hasta megahercios, existen modelos donde la misma puede ser seleccionada en la fábrica; por este motivo, es recomendable contar con un sensor de frecuencia natural de un rango mínimo de 10Hz (Raul Serrano Saenz, 2014).

Figura 5. Adquisición de datos de sensor de vibración y temperatura (Creación propia).



2.Sensores de Temperatura: En los diagnósticos industriales, los sensores de temperatura más comúnmente utilizados se categorizan como termopares, termistores y termómetros de resistencia (RTD). Si bien todos convierten la temperatura en una señal eléctrica, su física subyacente y, por lo tanto, su rendimiento difiere (Koshkouei et al., 2024).

Un termopar consiste en dos metales diferentes que generan una fuerza electromotriz proporcional al gradiente de temperatura. Ofrece una precisión moderada y requiere un punto frío de referencia, pero es muy adecuado para regiones extensas o procesos rápidos debido a su amplio rango (-200 °C – 1800 °C), buena robustez y la mejor respuesta dinámica entre todos los sensores de temperatura. Los RTD miden la temperatura a través del cambio casi lineal en la resistencia de un conductor, que suele ser de platino.

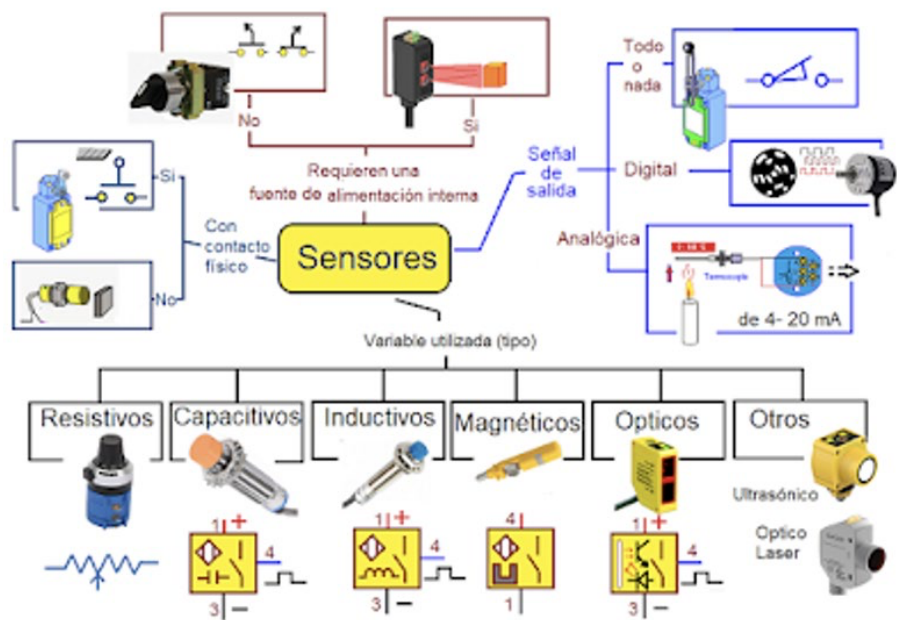
Los termistores, fabricados con óxidos semiconductores, tienen un rango de funcionamiento limitado (-50 °C a 150 °C) y responden muy rápido a los cambios de temperatura, pero presentan poca linealidad y alcance. Son ideales para equipos portátiles y mediciones en sitio. Al seleccionar un sensor, se deben considerar factores como

rango, precisión, tiempo de respuesta y condiciones del entorno: los RTD ofrecen mayor precisión, los termopares son más robustos y cubren un rango térmico amplio, mientras que los termistores destacan por ser económicos y rápidos. (Leonardo Zambrano Salazar & Katherine Gamboa López, 2024).

3.Los sensores ultrasónicos diagnósticos convierten pulsos eléctricos en vibraciones piezoeléctricas que generan ondas de alta frecuencia. Estas ondas, acopladas con gel o agua para evitar el aire, viajan por el material y, al encontrar una discontinuidad, producen un eco. El mismo cristal del sensor recibe este eco y lo transforma en una señal eléctrica, que se amplifica y digitaliza. El software analiza el tiempo de vuelo y la amplitud del eco, corrige la atenuación y genera imágenes (A-Scan, B-Scan o C-Scan) para determinar la profundidad y tamaño de fisuras. La precisión depende de la frecuencia, el ángulo del haz, el acoplamiento y la temperatura, permitiendo detectar fisuras internas de hasta 1-2 mm sin dañar la pieza. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990).

En la figura 6 se pueden observar algunos sensores utilizados en la industria para detección de fallas o bien el accionamiento de algún equipo o el apagado del mismo.

Figura 6. Sensores Industriales, diagrama de conexión y variables de sensor utilizados comúnmente(Autodiagnóstico de Fallas Con Sensores Inteligentes, 2025.)



Técnicas Avanzadas de Procesamiento de Señales

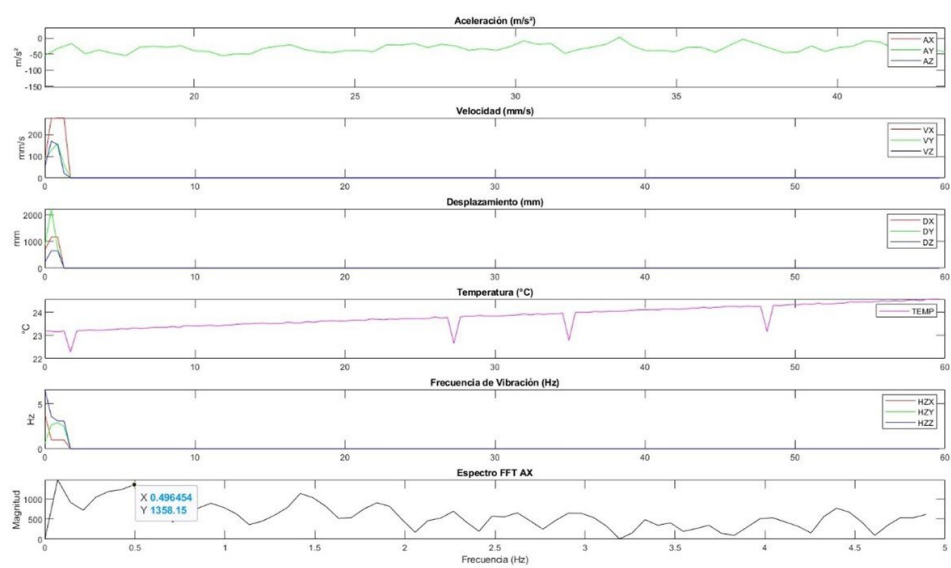
Transformadas y Análisis Espectral

El procesamiento de señales de sensores emplea técnicas sofisticadas para extraer información útil de datos complejos y ruidosos. La Transformada Rápida de Fourier (FFT) constituye la base del análisis espectral tradicional, permitiendo identificar componentes frecuenciales característicos de diferentes tipos de fallas(Qué Son Los Algoritmos de Clasificación y Cómo Se Aplican al Mantenimiento Predictivo, 2025).

Sin embargo, para señales no estacionarias y transitorias, la Transformada Wavelet ofrece ventajas superiores al proporcionar análisis tiempo-frecuencia que revela información más detallada sobre las señales. Esta técnica ha demostrado eficacia particular en la detección de fisuras en estructuras fijas con precisión superior a métodos tradicionales.

En la figura 7 se muestra un análisis de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) considera la IA por algoritmos (NNA) Redes neuronales.

Figura 7. Adquisición de señales por sensor de vibraciones Wit Motion WTVB-05 de pulsaciones del corazón (Creación propia).



Descomposición Modal Empírica

La Descomposición Modal Empírica (EMD) representa un avance significativo para el análisis de señales de vibración no lineales y no estacionarias. Esta técnica permite descomponer señales complejas en Funciones Modales Intrínsecas (IMF) que facilitan la extracción de características tanto en el dominio temporal como frecuencial (Cristian Efrén Granda Ordoñez, 2017).

Algoritmos de Machine Learning

La implementación de algoritmos de machine learning ha transformado la capacidad de detección y diagnóstico de fallas. Estos algoritmos aprenden a reconocer patrones que indican defectos, permitiendo una identificación más rápida y precisa

comparada con métodos tradicionales (Ratazzi et al., 2008). Uno de los retos en el análisis de datos es elegir el método adecuado para interpretar grandes cantidades de información. Dos de los métodos más utilizados en la actualidad son Random Forest y Support Vector Machines (SVM).

Ambos ayudan a las computadoras a tomar decisiones y hacer predicciones a partir de datos, pero funcionan de manera diferente y tienen ventajas particulares. Random Forest es un método que utiliza muchos “árboles de decisión” para analizar los datos. Cada árbol examina una parte de la información y, al combinar los resultados de todos, se obtiene una respuesta más precisa y confiable. Esta técnica es especialmente útil cuando se trabaja con bases de datos muy grandes y con muchas variables, ya que puede encontrar patrones

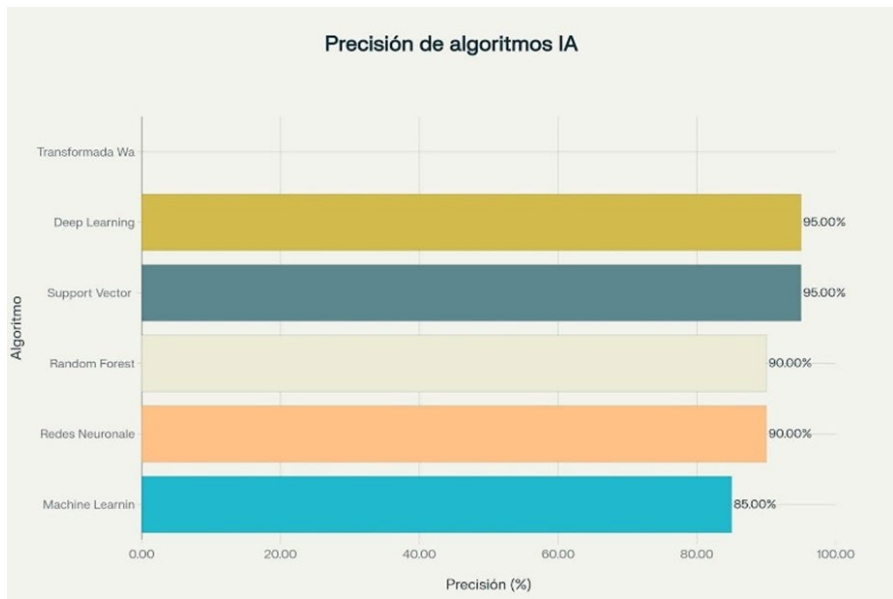
complejos y adaptarse a diferentes tipos de datos sin dificultad.

Por otro lado, Support Vector Machines (SVM) es un método que busca separar los datos en grupos de la mejor manera posible, como si dibujara una línea imaginaria que divide los diferentes tipos de información. Su principal fortaleza es que suele hacer buenas predicciones incluso cuando se enfrenta a datos nuevos, porque está diseñado para evitar errores y no sobreajustarse a los datos con los

que fue entrenado.

En la figura 8 se muestra el porcentaje de precisión que se puede obtener con cada uno de estos métodos. Esta comparación permite elegir cuál es el más adecuado según las necesidades del análisis: si se requiere rapidez y capacidad para manejar muchos datos, Random Forest suele ser la mejor opción; si se busca precisión y una buena capacidad de predicción con datos nuevos, SVM puede ser preferible.

Figura 8. Precisión de algoritmos de inteligencia artificial en detección de fallas estructurales (Creación propia).



Resultados y discusión.

Se realizaron dos estudios de caso para demostrar el funcionamiento de un sensor de vibraciones y demostrar como al adquirir una señal eléctrica se transforme en en valor considerado en las mediciones de vibración como son velocidad, aceleración, frecuencia de vibración y la FFT de Aceleración para determinar el punto de mal funcionamiento o en su caso cuando se desea determinar la existencia de una microfisura mediante la obtención de señales y a su vez utilizando algoritmos IA para determinar su funcionamiento y diagnostico determinado por el usuario.

Caso 1 Análisis de señales de vibración de los latidos del corazón

El análisis de señales que involucran las vibraciones

del corazón es una técnica moderna que permite estudiar los movimientos mecánicos debido a la actividad del corazón. Análoga a los diagnósticos ultrasónicos industriales, tal análisis se realiza utilizando sensores específicos que detectan vibraciones mínimas causadas por los latidos del corazón. Estas vibraciones se procesan y analizan para detectar aberraciones en el ritmo cardíaco, la contractibilidad del corazón y otros parámetros multidimensionales que influyen en el bienestar cardiovascular.

Este método comienza colocando sensores muy sensibles, como acelerómetros y dispositivos piezoeléctricos, en el pecho de la persona. Estos sensores captan los movimientos que produce el latido del corazón, es decir, las pequeñas vibraciones que genera al contraerse, luego, los sensores convierten esas vibraciones en señales eléctricas.

Estas señales se fortalecen y se limpian para quitar ruidos o sonidos que no están relacionados con el corazón.

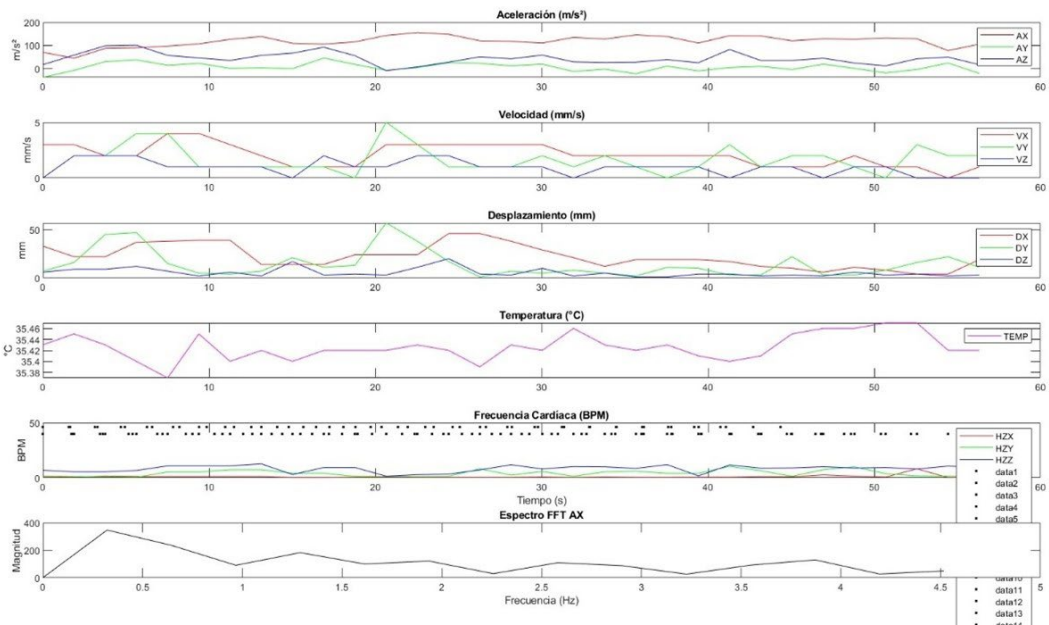
Después, se estudia la señal con una técnica llamada Transformada Rápida de Fourier (FFT de sus siglas en ingles), que ayuda a separar la señal en diferentes frecuencias. Esto es parecido a cuando escuchamos una canción y podemos distinguir instrumentos diferentes: el análisis detecta si hay patrones extraños en las vibraciones del corazón.

Este proceso es muy útil para detectar problemas como latidos irregulares (arritmias), falta de fuerza en el corazón o problemas con las válvulas que regulan el paso de la sangre. Además, al mostrar estas señales en un gráfico, los médicos pueden ver con claridad cualquier cambio en el ritmo del

corazón y tomar mejores decisiones para cuidar la salud del paciente. Por eso, analizar las vibraciones del corazón es una herramienta valiosa para controlar su funcionamiento y prevenir enfermedades graves.

Se obtuvieron resultados aceptables en el rango de 50 BPM utilizando un sensor Wit-Motion WTVB-05 CAN (Sensor genérico y de bajo costo) que nos registra datos de vibración como son frecuencias, velocidad, aceleración y en este caso se hizo un algoritmo para determinar con estos datos en Matlab de latidos del corazón o bien determinar cuántos latidos se registran en la posición donde se coloque el instrumento, se deberá mejorar algunos aspectos, pero en general se obtuvieron valores aceptables y mejorables para un estudio posterior, se muestra en la figura 9 como se registraron estos valores y datos que se obtuvieron a través de lo propuesto.

Figura 9. Adquisición de datos de vibración y transformados en latidos BPM con Matlab y sensor Wit-Motion WTVB-05 (Creación propia).

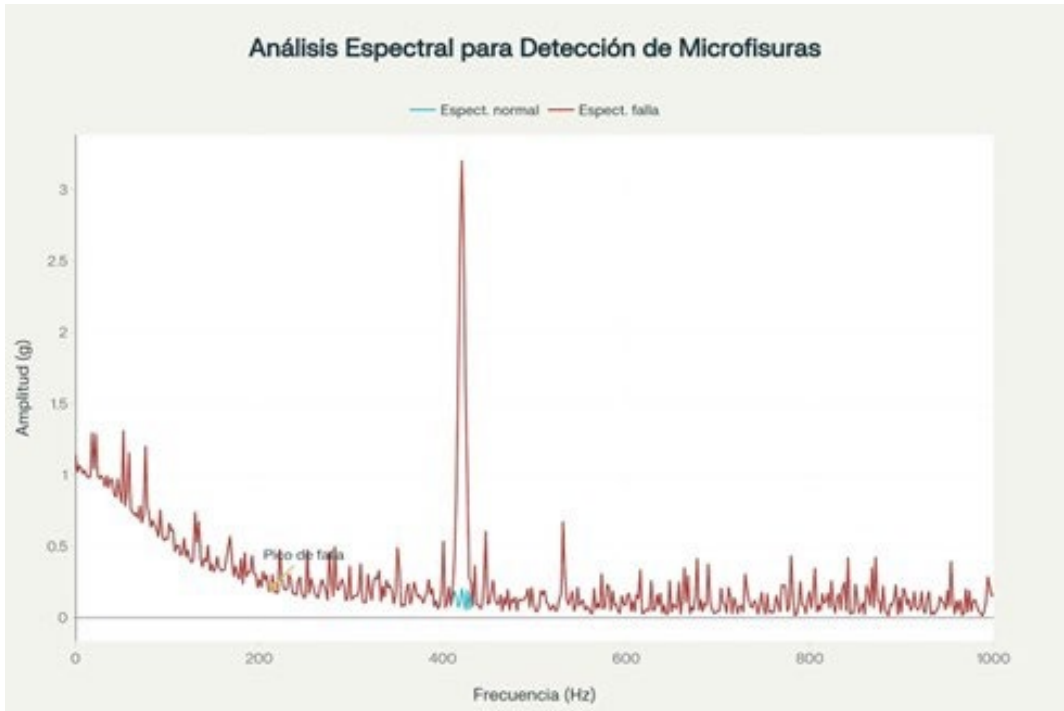


Caso 2. Medición de microfisuras con sensor de vibraciones etapa inicial

En este estudio, se aplicó un sistema de sensores de vibración para detectar microfisuras en materiales y componentes de estructuras que se muestra en la figura 10. Con los sensores ubicados en los nodos de la superficie para la toma de medidas, era posible registrar cambios en las frecuencias asociadas a la

vibración de los materiales y, por lo tanto, la presencia de las fisuras microscópicas. El procesamiento de datos de vibración por métodos tales como reflexión de Fourier revelaban la existencia de ciertos cambios en las propiedades del material que, en su momento, advertían de la existencia de las fisuras. Este sistema de control demostró su eficiencia en la prevención de estructuras, incrementando su seguridad y confiabilidad.

Figura 10. Análisis espectral FFT de una microfisura en un elemento mecánico.



Conclusiones.

1. El uso de sensores vibracionales para detectar microfisuras en materiales demuestra ser una técnica efectiva para identificar daños en etapas tempranas. Los sensores que analizan cambios en la vibración pueden identificar grietas y fisuras que son demasiado pequeñas para ser vistas con métodos convencionales. Esto hace que la evaluación de la integridad estructural sea mucho más precisa. Este método permite tomar medidas preventivas, lo que mejora la seguridad y durabilidad de las estructuras, particularmente en las críticas industrias aeroespacial, automotriz y de construcción.

Además, la implementación de esta tecnología ha demostrado ser beneficiosa en la monitorización y mantenimiento de la confiabilidad estructural, así como en la gestión y mejora de sistemas de infraestructura. Detectar fisuras en etapas más tempranas no solo previene fallos estructurales catastróficos, sino que también reduce los costos de mantenimiento porque se pueden realizar correcciones antes de que ocurran daños significativos. Esta capacidad de identificar fisuras en partes micro estructuralmente dañadas refuerza la importancia del paradigma de mantenimiento predictivo y contribuye a mejoras significativas

en la seguridad, la reducción de riesgos y la longevidad de los componentes estructurales.

2. Viabilidad y Aplicación del Análisis de Señales de Vibración del Corazón: Estudiar las vibraciones generadas por los latidos del corazón mediante sensores como los acelerómetros y los piezoeléctricos se considera una técnica innovadora para analizar la actividad mecánica del corazón. Este sistema permite el monitoreo de arritmias, la contractibilidad y otros parámetros importantes con alta precisión, por lo que resulta útil en la detección temprana de padecimientos como arritmias e insuficiencia cardíaca.

Eficiencia del Proceso de Análisis: La disolución de una señal en sus partes menores a través de la FFT, permite un análisis espectral más eficiente. Esto, a su vez, brinda la posibilidad de detectar irregularidades en los patrones vibratorios. La visibilidad y examinación de las señales logran mejorar la estimación y monitoreo del estado de salud cardiovascular al proveer un diagnóstico más exhaustivo.

Resultados y Mejoras Futuras: La precisión lograda en la identificación de las vibraciones cardíacas y el desarrollo del algoritmo para extraer la frecuencia asociada en Matlab fueron satisfactorios

dentro de los 50 BPM de rango utilizando el Wit-Motion WTVB-05 CAN. No obstante, hay aspectos donde se puede incorporar trabajo adicional en otros estudios con el propósito de aumentar la certeza y confiabilidad del sistema. De todas maneras, los resultados ya alcanzados a pesar de las limitaciones actuales generan oportunidades para su mejora en la medicina del monitoreo continuo de la salud cardíaca.

Declaración de conflicto de interés.

Los autores del presente trabajo declaramos no tener ningún tipo de conflicto de interés, ni financiero ni de relaciones personales que puedan influir en el presente artículo enviado a esta revista.

Referencias

- Detección de grietas y dimensionamiento (CDS) y ondas progresivas | Evident. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://ims.evidentscientific.com/es/learn/ndt-tutorials/flaw-detection/cds>
- Alvarez Q, L. I., Lozano M, C. A., & Bravo M, D. A. (2022). Methodology for Predictive Maintenance of Distribution Transformers based on Machine Learning. *Ingeniería (Colombia)*, 27(3). <https://doi.org/10.14483/23448393.17742>
- Autodiagnóstico de Fallas con Sensores Inteligentes. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://predictiva21.com/autodiagnostico-de-fallas-con-sensores-inteligentes>
- Avances Tecnológicos en Electrocardiografía. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://dgpdelpuerto.com/avances-tecnologicos-en-electrocardiografia-mas-alla-de-las-senales-cardiacas/>
- British Federal Mexico. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://bfmx.com/automatizacion-industrial/descubre-la-evolucion-y-la-historia-de-los-sensores-de-seguridad-para-robots/>
- Ceravolo, R., De Marinis, A., Pecorelli, M. L., & Zanotti Fragonara, L. (2017). Monitoring of masonry historical constructions: 10 years of static monitoring of the world's largest oval dome. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(10). <https://doi.org/10.1002/STC.1988>
- Cristian Efren Granda Ordoñez. (2017). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca Carrera De Ingeniería Electrónica Trabajo De Titulación Previo A La Obtención Del Título De Ingeniero Electrónico Proyecto Técnico: "Procesamiento De Señales De Vibración Mediante Descomposición Modal Empírica (Emd) Para La Extracción De Características Con Fines De Diagnóstico De Fallos En Maquinaria.
- ¿Deep Learning... y clasificación de imágenes? - IDECOR. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://www.idecor.gob.ar/introduccion-a-las-redes-neuronales-convolucionales-para-clasificacion-de-imagenes/>
- El costo del tiempo de inactividad: 21 estadísticas que necesita saber. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://trilio.io/es/digitales/costo-del-tiempo-de-inactividad/>
- Herrera, S. (2024). Sensores y sostenibilidad: la tecnología que protege vidas y recursos. *Revista Tecnología Sustentable*, 45, 18–25.
- Historial de los sistemas de adquisición de datos | Dewesoft. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://dewesoft.com/es/blog/historia-de-la-adquisicion-de-datos>
- Koshkouei, M. J., Fereshteh Saniee, N., & Barai, A. (2024). Thermocouple selection and its influence on temperature monitoring of lithium-ion cells. *Journal of Energy Storage*, 92, 112072. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.112072>
- Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1990). Ultrasonic Testing of Materials. In *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10680-8>
- La Historia de la Automatización Industrial: De la Producción Manual a la Máxima Eficiencia. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://datatechnic.com.mx/la-historia-de-la-automatizacion-industrial-de-la-produccion-manual-a-la-maxima-eficiencia/>
- Leonardo Zambrano Salazar, L. I., & Katherine Gamboa López, E. I. (2024). Aplicaciones de inteligencia artificial para la identificación de daños estructurales en edificaciones. Una revisión sistemática Artificial intelligence applications for the identification of structural damage in buildings. A systematic review Aplicações da inteligência artificial para a identificação de danos estruturais em edifícios. Uma revisão sistemática Ciências Técnicas y Aplicadas Artículo de Investigación. 9(7), 706–720. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i7.7526>
- López González, M. Á. (2009). Detección y diagnóstico de fallas en sensores de un motor de corriente directa. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. <http://hdl.handle.net/11285/569072>
- Mantenimiento Predictivo y sus Beneficios en La Industria | Cleverpy. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://cleverpy.com/mantenimiento-predictivo-industrial/>
- Mejía, L. A., Romero, C. A., & Monroy-Jaramillo, M. (2020). Pasado y presente en el diagnóstico de los motores en los talleres de servicio automotor. Del vacuómetro a los sistemas basados en la nube. *Informador Técnico*, 85(1), 107–125. <https://doi.org/10.23850/22565035.2623>
- Oroz Farfan, K. A., & Zapaille Neyra, N. A. (2024). Detección de daños estructurales utilizando un

- modelo numérico de una viga de concreto armado mediante la metodología de algoritmos de Machine Learning (ML). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/674705>
- Pérez Segura, M. E., Beltramo, E., Ribero, S., Aichino, A. C., & Preidikman, S. (2025). Detección de Fallas en Máquinas a Partir de Vibraciones Mecánicas con Técnicas de Aprendizaje Automático. *Mecánica Computacional*, 41(20), 1085–1094. <https://doi.org/10.70567/mc.v41i20.106>
- Qué son los algoritmos de clasificación y cómo se aplican al mantenimiento predictivo. (n.d.). Retrieved July 2, 2025, from <https://www.fractal.com/es/blog/algoritmos-de-clasificacion>
- Ratazzi, A. R., Bambill, D. V, Rossit, C. A., Maiz, S., Etse, J. G., Luccioni, B. M., Pucheta, M. A., & Storti, M. A. (2008). Application Of The Continuous Wavelet Transform To The Detection Of Cracks In A Frame Structure.
- Raul Serrano Saenz. (2014). Universidad Politécnica De Madrid Escuela Técnica Superior De Ingenieros Aeronáuticos Proyecto Fin De Carrera.
- Revolucionando la detección: la evolución de la tecnología de sensores | Balluff. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://www.balluff.com/es-mx/blog/revolucionando-la-deteccion-la-evolucion-de-la-tecnologia-de-sensores>
- Sensores inteligentes en la industria 4.0: optimización de la producción con visión artificial - Manufactura Noticias By Admin User - Blog Author. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://www.manufactura-latam.com/es/noticias/sensores-inteligentes-en-la-industria-40-optimizacion-de-la-produccion-con-vision>
- Torres, N. (2023). El valor silencioso del monitoreo de vibraciones. *Revista Ingeniería Viva*, 72, 41–46.

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación: 8 de noviembre de 2025.

El arte de enseñar a un robot a mover su brazo

Pacheco Richard Jorge Gabriel⁽¹⁾
Cortés Vega David⁽¹⁾
Vázquez Ávila José Luis⁽¹⁾
Alazki Hussain⁽¹⁾

RESUMEN

Los robots ya no son solamente parte de las películas futuristas: hoy se encuentran en las fábricas ensamblando automóviles, en hospitales asistiendo a cirujanos, en la exploración espacial, en el hogar e incluso en tareas educativas. Pero detrás de cada movimiento preciso de un robot se esconde un problema fascinante: ¿cómo calcular los pasos que debe dar un brazo robótico para moverse de un punto a otro sin errores, con suavidad y eficiencia?

En este trabajo se desarrolló un algoritmo programado en MATLAB que permite a un robot manipulador de 5 grados de libertad trazar trayectorias tridimensionales, tal como un cuadrado o una circunferencia, respetando siempre las limitaciones mecánicas y dinámicas de su diseño. En términos sencillos, se le enseñó al robot a “dibujar en el aire” sin desgastarse ni perder precisión. Este avance, probado en un robot educativo, demuestra cómo la unión entre matemáticas, programación y robótica puede convertirse en una herramienta poderosa para la industria, la medicina y la enseñanza. Aunque los resultados se aplicaron en un modelo académico, los principios que se utilizaron son los mismos que permiten a los brazos robóticos industriales soldar, pintar o manipular objetos con rapidez y exactitud.

Palabras Claves

Generación de trayectorias, Robótica, Cálculos de movimiento de un robot.

ABSTRACT

Robots are no longer just part of futuristic movies: today they can be found in factories assembling cars, in hospitals assisting surgeons, in space exploration, in households, and even in educational tasks. But behind every precise movement of a robot lies a fascinating challenge: how to calculate the steps a robotic arm must take to move from one point to another without errors, smoothly and efficiently? In this work, we developed an algorithm programmed in MATLAB that allows a five-degree-of-freedom manipulator robot to trace three-dimensional trajectories, such as a square or a circle, while always respecting the mechanical and dynamic limitations of its design. Put simply, the robot was taught to “draw in the air” without wearing itself out or losing accuracy. This advancement, tested on an educational robot, demonstrates how the combination of mathematics, programming, and

⁽¹⁾ Profesores Investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche, Av. Central S/N con Fracc. Mundo Maya CP. 24115.

robotics can become a powerful tool for industry, medicine, and education. Although the results were applied to an academic model, the principles used are the same ones that enable industrial robotic arms to weld, paint, or manipulate objects with speed and precision.

Keywords

Trajectory generation, Robotics, Robot motion calculations.

Introducción.

¿Qué son los Robots Manipuladores?

Un robot manipulador es, en términos sencillos, un brazo mecánico diseñado para realizar movimientos precisos. Está formado por eslabones (las piezas rígidas, equivalentes a los huesos humanos) y articulaciones (los puntos de unión, equivalentes a los codos o muñecas). Gracias a esta combinación, el robot puede mover la punta de su brazo, para realizar tareas como agarrar, soldar, pintar o ensamblar.

¿Qué significa una trayectoria en robótica?

Una trayectoria en robótica es un camino en el espacio tridimensional que el robot debe recorrer con su herramienta, también llamada efector final. Imagina pedirle a un robot que trace con un marcador la silueta de una estrella sobre una pizarra. Para cumplir la tarea, su "mano" debe moverse siguiendo exactamente los bordes de la figura. Esto implica dos retos: saber qué camino debe recorrer la punta de su brazo y cómo deben moverse cada una de sus articulaciones para lograrlo. Es como cuando aprendemos a escribir. No basta con saber qué letras queremos dibujar: también debemos coordinar hombro, codo y muñeca para que las palabras aparezcan sobre el papel.

Las trayectorias pueden ser simples, como una línea recta de un punto "A" hacia un punto "B", o extremadamente complejas, como las curvas irregulares que un robot debe seguir al realizar una sutura en una operación quirúrgica. También hay trayectorias que deben adaptarse en tiempo real, p. ej. cuando un brazo robótico colabora con un humano en una línea de producción compartida. En resumen, la trayectoria es el corazón del movimiento robótico. Sin ella, el robot sería como un músico sin partitura: tendría el instrumento, pero no sabría qué tocar.

Los robots en nuestra vida cotidiana.

Los robots forman parte de nuestro día a día, aunque muchas veces no nos demos cuenta. Cuando vemos un coche recién pintado en una planta automotriz, lo más probable es que haya sido un robot quien realizó la tarea con un acabado perfecto. En un hospital, un brazo robótico puede asistir a un cirujano en una operación de alta precisión. En el espacio, sondas y rovers con brazos articulados recogen muestras o ensamblan piezas en condiciones donde un ser humano no podría trabajar.

La robótica, en pocas décadas, ha pasado de ser un sueño de la ciencia ficción a convertirse en una tecnología esencial. Y dentro de esta disciplina, los robots manipuladores, esto es, esos brazos mecánicos con articulaciones que recuerdan a un brazo humano son protagonistas indiscutibles.

Los brazos robóticos: bailarines del mundo tecnológico.

Imagina un escenario lleno de bailarines profesionales. Cada uno de ellos sabe qué pasos dar, en qué momento, con qué intensidad. Sus movimientos deben coordinarse para que el espectáculo tenga sentido. Así funcionan los brazos robóticos: son bailarines mecánicos que deben ejecutar una coreografía exacta.

Cada articulación de un brazo robótico equivale a una parte de nuestro cuerpo: hombro, codo, muñeca. Si una se mueve antes de tiempo o con un ángulo incorrecto, toda la tarea falla. La diferencia con un bailarín humano es que el robot no improvisa: necesita instrucciones detalladas para cada paso. Esa lista de instrucciones es lo que llamamos trayectoria. Para entenderlo mejor, pensemos en la cocina. Cuando un chef prepara un platillo complicado, cada movimiento debe estar planeado: cortar, revolver, sazonar, servir. Un error en el tiempo o en la secuencia puede arruinar la receta. Los robots se enfrentan al mismo dilema: sus "recetas" son trayectorias matemáticas que deben cumplirse al pie de la letra. La única diferencia es que, en lugar de ingredientes, manipulan herramientas, piezas o incluso tejidos biológicos en un quirófano.

En la industria automotriz, p. ej. los robots ensamblan piezas durante horas sin detenerse. Para lograrlo, cada soldadura, cada movimiento, se encuentra perfectamente calculado. El robot no se cansa ni se distrae, pero tampoco inventa sus propios movimientos: depende del plan trazado por ingenieros y programadores. Este concepto de

coreografía mecánica se extiende a todas las áreas de la robótica: desde robots que ordenan paquetes en un almacén hasta los que exploran otros planetas.

El reto de mover un brazo robótico.

Mover un brazo humano parece sencillo: nuestro cerebro coordina automáticamente hombro, codo y muñeca para que nuestra mano llegue justo al lugar deseado. Pero si intentamos que un robot lo haga, el problema se vuelve complejo. ¿Qué ángulos debe adoptar cada articulación? ¿A qué velocidad deben moverse los motores para que el movimiento sea fluido y no brusco? ¿Cómo evitar posiciones que desgasten al robot o lo hagan consumir más energía de la necesaria? Aquí es donde entra la planificación de trayectorias. Se trata de definir el camino que debe seguir el extremo del brazo para realizar su tarea. Una vez definida, entra en juego la matemática: cálculos que traducen esa trayectoria en instrucciones precisas para cada motor y cada articulación.

Un campo en evolución constante.

La robótica avanza rápidamente y cada día aparecen nuevas tendencias. Hoy se habla de robótica blanda, inspirada en organismos vivos que se mueven con suavidad; de enjambres de robots, donde muchos trabajan en conjunto como si fueran una colonia de hormigas; y de robótica social, con máquinas capaces de interactuar de forma natural con las personas. Sin embargo, en el corazón de muchas de estas aplicaciones sigue estando la misma pregunta: ¿cómo lograr que un robot se mueva con exactitud siguiendo una trayectoria específica? Resolver esta pregunta es esencial no solo para optimizar procesos industriales, sino también para abrir nuevas posibilidades en la vida cotidiana, desde prótesis robóticas más precisas hasta sistemas de exploración espacial más confiables.

Las articulaciones de los robots: hombros, codos y muñecas mecánicas.

Así como el cuerpo humano tiene diferentes tipos de articulaciones, los robots también. Algunas articulaciones permiten deslizamientos rectos (articulación prismática, como se muestra en la fig. 1.a), otras permiten giros (articulación rotacional, como se muestra en la fig. 1.b), y otras combinan movimientos (cilíndricas, de tornillo, esféricas, silla de montar, como se muestran en fig. 2.a, fig. 2.b, fig. 3.a, fig. 3.b, respectivamente). El conjunto de estas articulaciones determina cuántos GDL tiene un robot, es decir, cuántos movimientos

independientes puede realizar. p. ej. un robot de 3 GDL puede moverse en las direcciones básicas del espacio (arriba-abajo, adelante-atrás, izquierda-derecha); un robot de 5 o 6 GDL, como el usado en este estudio, puede realizar movimientos más complejos, similares a los de un brazo humano.

Figura 1. Articulaciones robóticas: a) Prismática, b) Rotacional.

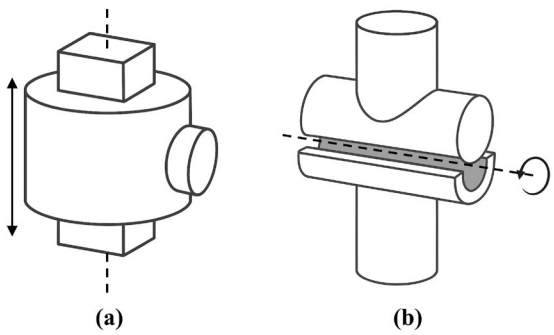


Figura 2. Articulaciones robóticas: a) Cilíndrica, b) Tornillo.

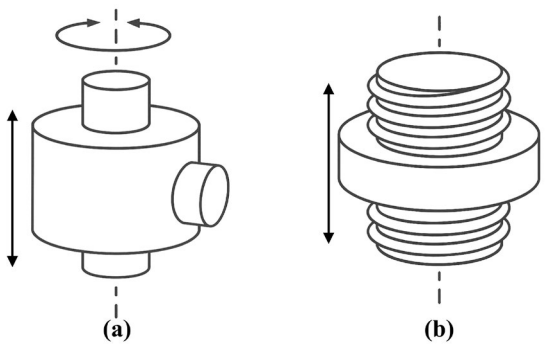
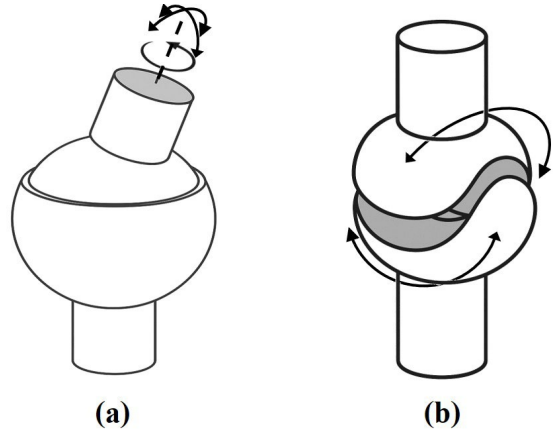


Figura 3. Articulaciones robóticas: a) Esférica, b) Silla de montar.



Los distintos tipos de brazos robóticos.

Los robots manipuladores se agrupan en diferentes tipos según su configuración que afecta directamente el alcance, flexibilidad, y precisión del robot.

- Robots cartesianos: se mueven en líneas rectas a lo largo de los ejes X, Y y Z, como si trabajaran dentro de una caja invisible. En la figura 4.a se muestra una configuración de un robot cartesiano.

- Robots cilíndricos: combinan giros con deslizamientos, lo que les permite alcanzar un espacio de trabajo con forma de cilindro. En la figura 4.b se muestra una configuración de un robot cilíndrico.

- Robots esféricos: sus movimientos cubren un volumen con forma de esfera, gracias a combinaciones de giros y extensiones. En la

figura 5.a se muestra una configuración de un robot esférico.

- Robots SCARA: especializados en ensamblaje rápido, con gran flexibilidad en el plano horizontal y rigidez en el vertical. En la figura 5.b se muestra una configuración de un robot SCARA.

- Robots antropomórficos: imitan el movimiento de un brazo humano, con múltiples articulaciones y gran versatilidad. En la figura 6 se muestra una configuración de un robot antropomórfico.

El robot usado en este estudio, el Thermo CRS CataLyst-5, es un robot antropomórfico de 5 GDL. Por su diseño educativo, resulta ideal para experimentar con algoritmos de trayectoria, ya que permite comprobar en un entorno controlado cómo se trasladan las fórmulas matemáticas al movimiento real de un brazo robótico.

Figura 4. Configuraciones robóticas: a) Cartesiana, b) Cilíndrica.

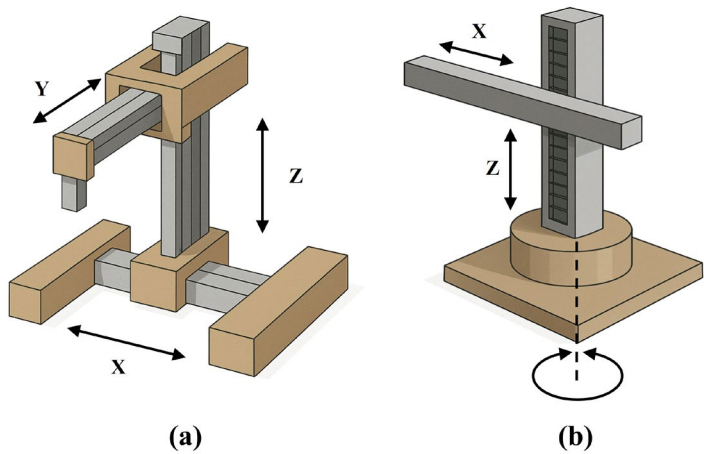


Figura 5. Configuraciones robóticas: a) Esférica, b) SCARA.

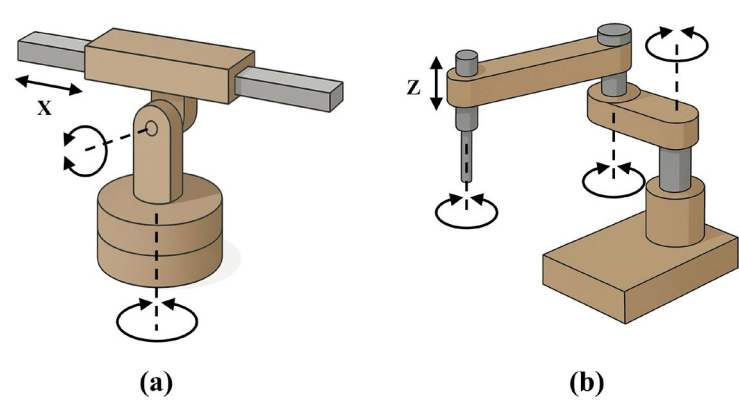
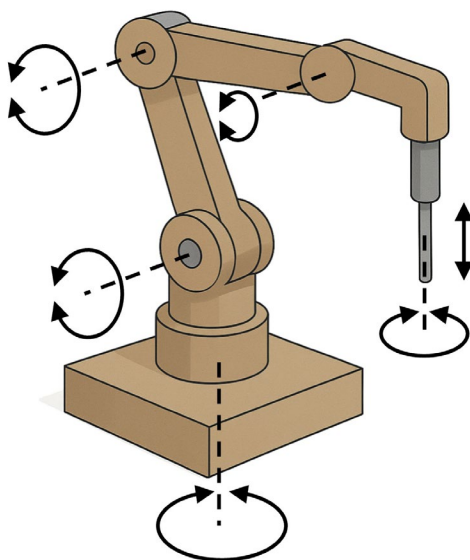


Figura 6. Configuración robótica antropomórfica.



Aplicaciones prácticas de los robots: del laboratorio a la vida diaria.

Los progresos tecnológicos han hecho que los robots dejen de ser exclusivos de la industria para convertirse en parte de nuestra vida diaria. Ya no sólo fabrican coches o realizan tareas en laboratorios, también colaboran en actividades cotidianas que afectan nuestra forma de trabajar, cuidar la salud y relacionarnos con el entorno. Algunas aplicaciones prácticas de los robots se mencionan enseguida:

- Industria automotriz: soldaduras repetitivas y precisas.
- Medicina: brazos robóticos que asisten en operaciones.
- Exploración espacial: manipulación de instrumentos en la Estación Espacial Internacional.
- Logística: clasificación de paquetes en almacenes.
- Hogar: robots domésticos del futuro.
- Educación: robots didácticos para enseñar matemáticas, física y programación.

- Agricultura: robots que plantan, riegan y cosechan con precisión.

- Rescate y emergencias: máquinas que pueden moverse en terrenos irregulares y acceder a lugares peligrosos para salvar vidas.

De la teoría a la práctica: probando algoritmos con un robot.

Para poner a prueba el algoritmo diseñado, se utilizó un brazo robótico articulado de 5 GDL, un modelo empleado habitualmente en la enseñanza de robótica. Se trata del Thermo CRS CataLyst-5, un manipulador que permite simular y experimentar con movimientos similares a los de un robot industrial, pero en un entorno académico y de investigación.

Este robot se asemeja a un brazo humano, ya que sus articulaciones y segmentos imitan la forma en que movemos nuestros hombros, codos y muñecas. En la figura 7 puede verse el dispositivo junto con una comparación de sus movimientos con los de un brazo humano. Además, los rangos de giro permitidos en cada articulación especificados por el fabricante se detallan en la tabla 1.

Figura 7. Comparación de las articulaciones y eslabones del robot manipulador Thermo CRS CataLyst-5 Articulated Robot con un ser humano

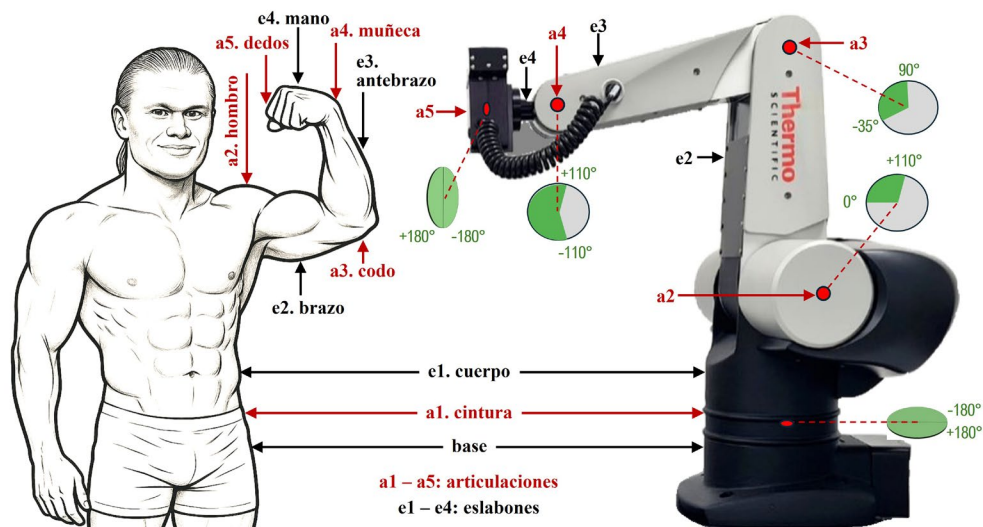


Tabla 1. Ángulos de trabajo de las articulaciones del Robot Manipulador: Thermo CRS Catalyst-5Articulated Robot.

Valor asociado con cada articulación:				
Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5
+180°/-180°	+110°/0°	+90°/-35°	+110°/-110°	+180°/-180°

Fuente: Thermo CRS Catalyst-5Articulated Robot, n.d. <https://www.equipx.net>

Cinemática: el lenguaje secreto de los robots.

La robótica tiene un lenguaje propio para hablar de movimiento: la cinemática. Sus dos ramas principales son:

- Cinemática directa: permite calcular dónde se encontrará la punta del brazo del robot si ya conocemos los ángulos de sus articulaciones.
- Cinemática inversa: parte de un punto deseado en el espacio y calcula qué ángulos deben adoptar las articulaciones para alcanzarlo.

Resolver la cinemática inversa puede ser muy complicado, sobre todo en robots con muchos GDL. En un brazo de cinco articulaciones, las posibles combinaciones de movimientos son numerosas. El

desafío consiste en encontrar la correcta en el menor tiempo posible. Aquí es donde entran los algoritmos y, más recientemente, la inteligencia artificial: hoy se exploran técnicas como redes neuronales que aprenden a resolver la cinemática inversa más rápido que los métodos tradicionales.

Para entenderlo mejor, imaginemos que tenemos un rompecabezas en 3D. La cinemática directa sería armarlo siguiendo instrucciones paso a paso, mientras que la cinemática inversa sería ver la figura final y deducir cómo deben encajar las piezas para llegar a ella. Este proceso, que parece simple en teoría, se vuelve complejo cuando hablamos de movimientos continuos en el espacio.

El reto de la suavidad.

Imagina que conduces un auto hacia un estacionamiento. Llegas al destino, pero das giros

violentos y frenas bruscamente. El resultado: desgaste del coche, incomodidad para los pasajeros y riesgo de accidente. Algo similar ocurre en la robótica: no basta con que el robot llegue al punto correcto, debe hacerlo suavemente.

Si los movimientos son bruscos, se generan sobrecargas en los motores, se desgastan las piezas y aumenta el consumo de energía. En tareas delicadas, como una operación quirúrgica, los movimientos bruscos podrían incluso poner en riesgo vidas humanas. Este aspecto ha llevado a desarrollar métodos de interpolación y suavizado de trayectorias que hacen que cada movimiento sea comparable al trazo elegante de un pincel sobre un lienzo.

Un ejemplo cotidiano de este concepto es montar en bicicleta. Si pedaleamos con movimientos bruscos, corremos el riesgo de perder el equilibrio o caer. En cambio, si los movimientos son fluidos, el trayecto es más seguro y agradable. De la misma manera, un robot debe "pedalear" con suavidad para mantener la armonía de sus movimientos.

El experimento: un brazo robótico educativo.

El objetivo era sencillo de enunciar, pero complejo de ejecutar: lograr que el robot dibujara un cuadrado y una circunferencia en el aire, siguiendo trayectorias precisas y sin forzar sus articulaciones. Para ello se programó un algoritmo en el software MATLAB.

El proceso consistió en dos pasos: primero se calculó la cinemática inversa (los ángulos que debía adoptar cada articulación en cada instante) y luego se verificó con la cinemática directa (visualizando en un entorno virtual si efectivamente seguía el camino trazado). Este doble chequeo garantiza que el movimiento planeado en el papel se ejecute correctamente en la máquina.

Cómo enseñar a los robots a moverse con precisión: el reto de planificar trayectorias

Cuando vemos un brazo robótico en acción, nos sorprende su exactitud: pinta, suelda o coloca piezas diminutas sin titubear. Sin embargo, esa precisión no es espontánea, sino fruto de una cuidadosa planificación. El gran desafío consiste en diseñar trayectorias tridimensionales que permitan al robot moverse de manera precisa, eficiente y segura, sin forzar sus límites.

Esto implica considerar dos tipos de restricciones. Por un lado, las cinemáticas, que dictan hasta dónde puede estirarse el robot, a qué velocidades y

aceleraciones puede moverse y qué posiciones son físicamente posibles. Por otro, las dinámicas, que dependen de las fuerzas y torques que sus motores y engranajes pueden soportar sin dañarse ni consumir energía en exceso.

La pregunta que guía esta investigación puede parecer sencilla, pero esconde una gran complejidad: ¿Cómo generar trayectorias que respeten al mismo tiempo las limitaciones cinemáticas y dinámicas de un robot manipulador?

Resolver este reto no es un ejercicio académico aislado. Tiene consecuencias directas en la industria, donde los robots deben repetir tareas miles de veces sin fallar y en la medicina, donde un error minúsculo durante una cirugía asistida por robot puede tener resultados críticos.

Retos éticos y sociales.

El crecimiento de la robótica plantea preguntas más allá de lo técnico: ¿qué trabajos sustituirán los robots?, ¿cómo garantizar que la tecnología beneficie a todos?, ¿qué implicaciones tiene que máquinas imiten nuestros movimientos? Estos debates deben acompañar a los avances científicos para asegurar un futuro justo.

La historia nos enseña que cada revolución tecnológica genera temores y oportunidades. La revolución industrial del siglo XIX eliminó muchos oficios manuales, pero también creó industrias enteras que antes no existían. Algo similar ocurre con la robótica: algunos trabajos desaparecerán, pero surgirán otros que hoy ni imaginamos.

Resultados

Los caminos que recorrerá el brazo robótico.

El algoritmo desarrollado en MATLAB se probó en un robot de 5 GDL, el Thermo CRS CataLyst-5. Como primer paso, se le pidió ejecutar dos trayectorias tridimensionales aparentemente simples: un cuadrado y una circunferencia. Aunque a simple vista estas figuras parecen elementales, en robótica representan un verdadero desafío, pues requieren la coordinación precisa de todas las articulaciones para que el brazo logre mover su extremo con suavidad a lo largo del recorrido.

Un robot que dibuja con precisión.

Para evaluar el desempeño del algoritmo, se analizaron las trayectorias del robot tanto en dos (2D) como en tres dimensiones (3D).

1. Gráficas en 2D: Muestran cómo cambian los ángulos de cada una de las cinco articulaciones con respecto al tiempo. Gracias a estas gráficas fue posible observar que los movimientos eran fluidos y no presentaban variaciones bruscas, lo que garantiza un desempeño seguro y eficiente del robot.

2. Gráficas en 3D: representaban la posición del robot y su efector final en el espacio tridimensional. Aquí se pudo visualizar cómo el robot “dibujaba” en el aire el cuadrado y la circunferencia, confirmando que el algoritmo cumplía con su objetivo.

El robot logró realizar trayectorias suaves y precisas. En el caso del cuadrado, cada ángulo de

sus articulaciones se ajustó con exactitud, logrando que la punta de su brazo recorriera los cuatro lados. En el caso de la circunferencia, el movimiento resultó fluido, como el trazo de un compás invisible.

Lo más destacable fue que los movimientos cumplieron con las restricciones impuestas por el fabricante, lo que significa que el robot puede ejecutar estas trayectorias sin dañarse ni gastar energía innecesaria. Se demostró que el algoritmo desarrollado no sólo es funcional, sino también eficiente y seguro. Las trayectorias de referencias se presentan en las Figuras 8-9 y son en relación a un cuadrado y a una circunferencia respectivamente.

Figura 8. Gráficas para la trayectoria de referencia 3D cuadrada.
a) ángulos de las articulaciones, b) posición del robot en el espacio 3D

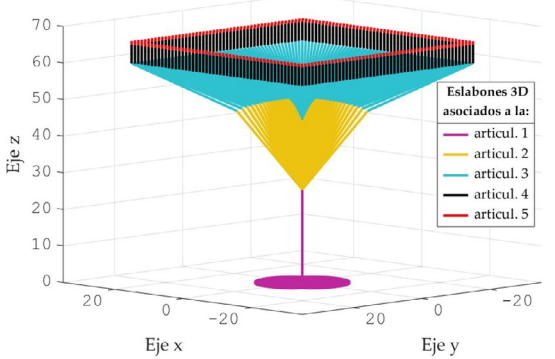
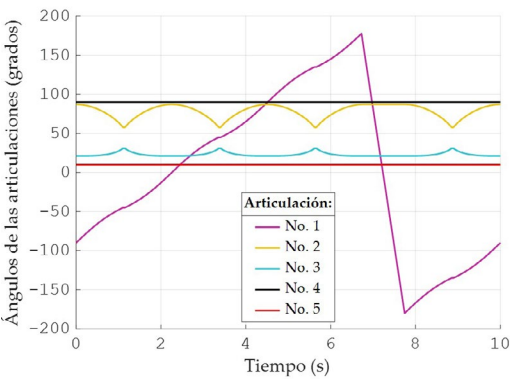
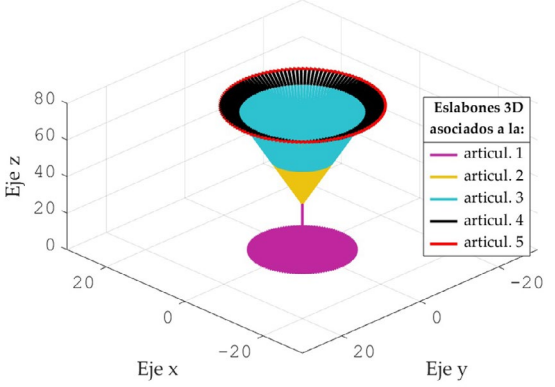
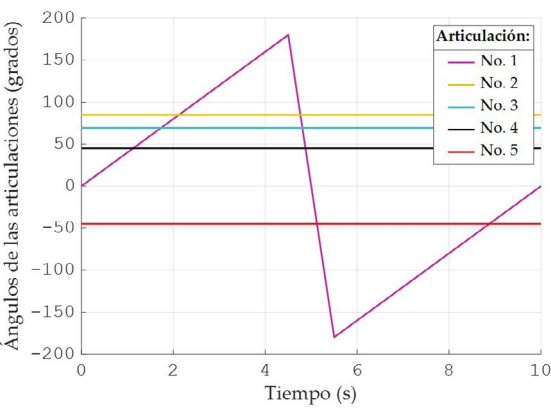


Figura 9. Gráficas para la trayectoria de referencia 3D circunferencia.
a) ángulos de las articulaciones, b) posición del robot en el espacio 3D



Más allá de cuadrados y círculos: trayectorias complejas.

Aunque los ejemplos utilizados son simples, los algoritmos de trayectorias pueden aplicarse a movimientos mucho más complejos. En cirugía, por ejemplo, los robots deben seguir trayectorias irregulares dentro del cuerpo humano. En la exploración espacial, los robots deben manipular objetos flotantes en condiciones de ingravidez. En la agricultura, robots especializados deben recorrer campos siguiendo líneas curvas y adaptarse a terrenos irregulares. Cada caso requiere ajustes específicos y algoritmos capaces de adaptarse a múltiples escenarios.

Otro ejemplo son los robots de rescate en catástrofes naturales. Estos deben ingresar a espacios colapsados, esquivar escombros y alcanzar víctimas atrapadas. Las trayectorias en estos casos no pueden ser predefinidas: deben adaptarse constantemente a un entorno cambiante e impredecible.

Discusión de los resultados.

El análisis de estas trayectorias permitió confirmar varios aspectos importantes:

- **Movimientos suaves:** los ángulos calculados no mostraron picos bruscos, lo que significa que el robot no se vería obligado a realizar esfuerzos repentinos que pudieran dañarlo.
- **Cumplimiento de especificaciones:** las trayectorias respetaron los límites de movilidad establecidos por el fabricante, garantizando que el robot trabajara dentro de condiciones seguras.
- **Aplicabilidad del método:** aunque las pruebas se hicieron con trayectorias básicas y en un robot educativo, los mismos principios matemáticos y computacionales pueden aplicarse en contextos industriales y médicos, donde se requieren trayectorias mucho más complejas.

En términos generales podríamos decir que el robot aprendió a “dibujar con el brazo en el aire” de manera controlada, sin salirse de la hoja invisible donde debía hacerlo y sin forzar su cuerpo mecánico.

Conclusiones.

El estudio mostró que, con la ayuda de las matemáticas y la programación, es posible enseñar a un robot a moverse con precisión y sin poner en riesgo su integridad mecánica. El algoritmo creado

en MATLAB permitió que el robot de 5 GDL siguiera trayectorias tridimensionales (como un cuadrado y una circunferencia) de manera fluida, respetando las restricciones cinemáticas y dinámicas definidas por su fabricante. En otras palabras, el robot no sólo fue capaz de “dibujar en el aire” estas figuras geométricas, sino que lo hizo sin movimientos bruscos, sin forzar sus articulaciones y sin consumir energía de forma innecesaria. Esto es fundamental para garantizar la eficiencia, seguridad y durabilidad de los robots, tanto en entornos educativos como industriales y médicos.

Si lo miramos desde un ángulo más amplio, este trabajo confirma algo esencial: la robótica no es únicamente hardware (motores, engranajes, brazos metálicos), sino también software e inteligencia matemática. Sin algoritmos como este, los robots serían máquinas rígidas, incapaces de adaptarse a las necesidades de precisión y repetitividad que se requieren en el mundo real.

La investigación abre la puerta a múltiples aplicaciones prácticas. Si bien las pruebas se realizaron con un robot educativo, el mismo enfoque puede aplicarse a brazos robóticos industriales capaces de soldar, ensamblar o pintar, realizar misiones espaciales, o incluso a robots médicos que deben realizar procedimientos delicados en quirófanos.

En una metáfora sencilla: programar un robot es como enseñarle a bailar. No basta con decirle “muévete”; hay que marcarle los pasos, el ritmo y las posiciones adecuadas. Este trabajo representa un primer ensayo exitoso de esa coreografía: un robot que aprende a moverse con gracia, precisión y seguridad.

Reflexión final

Vivimos en una época donde los robots se están integrando cada vez más en nuestra vida cotidiana. Para algunos, esto despierta temor; para otros, fascinación. Lo cierto es que, detrás de cada brazo robótico que pinta un automóvil o de cada robot quirúrgico que ayuda a salvar una vida, hay horas de investigación, cálculos matemáticos y programación.

El aporte de este trabajo es una muestra clara de cómo la ciencia y la ingeniería, cuando se traducen a un lenguaje sencillo, nos permiten entender que lo que parece magia en realidad es fruto del ingenio humano. La próxima vez que veas a un robot moverse con precisión, recuerda que detrás de cada gesto mecánico hubo un científico o ingeniero que,

como en este estudio, le enseñó a seguir su propio “mapa de movimiento”.

Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>

Referencias

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación: 5 de noviembre de 2025.

- Álvarez-Sánchez, E. J., López, M. A., & Ramírez, P. (2024). Tendencias actuales en el desarrollo de la robótica en México. *Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*.
- Asimov, I. (1983). *Robots and empire*. Doubleday.
- Baturone, A. O. (2005). *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. Marcombo.
- Bekey, G. A. (2005). *Autonomous robots: From biological inspiration to implementation and control*. MIT Press.
- Brooks, R. (2002). *Flesh and machines: How robots will change us*. Pantheon.
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*. W. W. Norton & Company.
- Caro, J. Á. G. (2014). *La robótica industrial en el ámbito de la automatización global*. Técnica Industrial.
- Colorado, R. M. (2016). *Cinemática y dinámica de robots manipuladores*. Alpha Editorial.
- Ford, M. (2015). *Rise of the robots: Technology and the threat of a jobless future*. Basic Books.
- Haselirad, A., & Neubert, J. (2014). A comparison of three trajectory planning methods for smooth motion in 5-DOF manipulators. *International Journal of Control*.
- Huang, H. L., Cheng, M. Y., & Huang, T. Y. (2023). A rapid base parameter physical feasibility test algorithm for industrial robot manipulator identification using a recurrent neural network. *IEEE Access*.
- IEEE Spectrum. (2023). The future of robotics: From factories to homes. *IEEE Spectrum*.
- Kurzweil, R. (2005). *The singularity is near: When humans transcend biology*. Viking Penguin.
- Latombe, J. C. (1991). *Robot motion planning*. Springer.
- MIT Technology Review. (2022). *La próxima generación de robots inteligentes*. MIT Technology Review. MIT Press.
- Murphy, R. R. (2014). *Disaster robotics*. MIT Press.
- National Geographic. (2023). *Robots que aprenden del cuerpo humano*. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com>
- Pérez Vidal, A. J., Rodríguez, M. L., & Gómez, F. R. (2017). Evolución de la robótica social y nuevas tendencias. En *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática*.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). *Springer handbook of robotics*. Springer.
- Tegmark, M. (2017). *Life 3.0: Being human in the age of artificial intelligence*. Penguin.
- Thrun, S. (2002). *Robotic mapping: A survey*. Carnegie Mellon University Technical Report.
- Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018).

Cómo obtener hidrógeno del agua de mar: la nueva energía limpia en camino

La historia, los desafíos y el futuro de una tecnología clave para enfrentar el cambio climático

López Oliveros Mariano⁽¹⁾
Álvarez Arellano Juan Antonio⁽²⁾
Hamzaoui Youness El⁽²⁾

RESUMEN

El hidrógeno verde es considerado una de las soluciones más prometedoras frente al cambio climático por su capacidad de generar energía limpia y versátil. Tradicionalmente se obtiene a partir de agua dulce, un recurso escaso, lo que plantea retos de sostenibilidad. En este artículo se explora la posibilidad de producir hidrógeno directamente del agua de mar, un recurso abundante que cubre más del 70 % del planeta. Se revisa la historia del hidrógeno, el funcionamiento de la electrólisis, los principales avances científicos y tecnológicos —como catalizadores resistentes, electrolizadores híbridos, prototipos solares e inteligencia artificial—, así como los beneficios ambientales, económicos y geopolíticos de esta alternativa. Se destaca el caso de México y el Golfo de México, donde la integración de hidrógeno marino en la infraestructura energética existente podría impulsar la transición hacia energías limpias, reducir la huella de carbono de la industria petrolera y posicionar al país como líder regional en exportación de energía sostenible.

Palabras clave

Hidrógeno verde; electrólisis de agua de mar; energía renovable; transición energética; México;

Golfo de México; cambio climático; innovación tecnológica.

Introducción

El cambio climático ya no es un escenario futuro: es una realidad que golpea a millones de personas en todo el mundo. Olas de calor que rompen récords cada año, sequías prolongadas que afectan cultivos y suministro de agua, huracanes cada vez más violentos en las costas, incendios forestales de gran magnitud. Todo esto tiene un mismo origen: la acumulación de gases de efecto invernadero, sobre todo dióxido de carbono (CO₂), resultado de la quema masiva de combustibles fósiles como petróleo, gas y carbón. La humanidad enfrenta una pregunta decisiva: ¿cómo mantener funcionando nuestras sociedades modernas sin depender de las energías que dañan al planeta? La respuesta no será única, pero entre las alternativas más prometedoras destaca una: el hidrógeno verde.

Se le llama verde porque se produce mediante la electrólisis del agua, es decir, separando el agua en oxígeno e hidrógeno usando electricidad. Y si esa electricidad proviene de fuentes renovables —como la solar o la eólica—, obtenemos un combustible que,

⁽¹⁾ Estudiante de doctorado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche, Av. Central S/N con Fracc. Mundo Maya CP. 24115. ⁽²⁾ Profesores de doctorado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche, Av. Central S/N con Fracc. Mundo Maya CP. 24115.

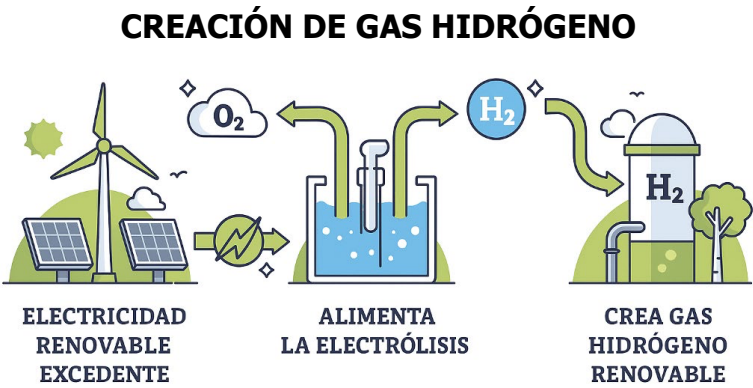
al usarse, solo libera vapor de agua (International Energy Agency [IEA], 2021). Es como tener una batería ligera y versátil, capaz de mover autos, barcos, aviones o fábricas, pero sin dejar rastro de contaminación.

El gran desafío es que hoy, para producir hidrógeno, se usa principalmente agua dulce purificada. Y aquí surge el dilema: ¿podemos gastar un recurso cada vez más escaso, necesario para beber, sembrar y

vivir, en producir combustible?

La respuesta puede estar frente a nosotros, en un recurso casi inagotable: el agua de mar. Los océanos cubren más del 70 % del planeta y concentran más del 95 % de toda el agua existente (Good New Energy, 2023). Si aprendemos a producir hidrógeno directamente del mar, no solo protegeremos el agua dulce, sino que abriremos una nueva etapa en la transición energética mundial.

Figura 1. Creación de gas hidrógeno a partir de electricidad renovable. Adaptado de Depositphotos (s.f.)



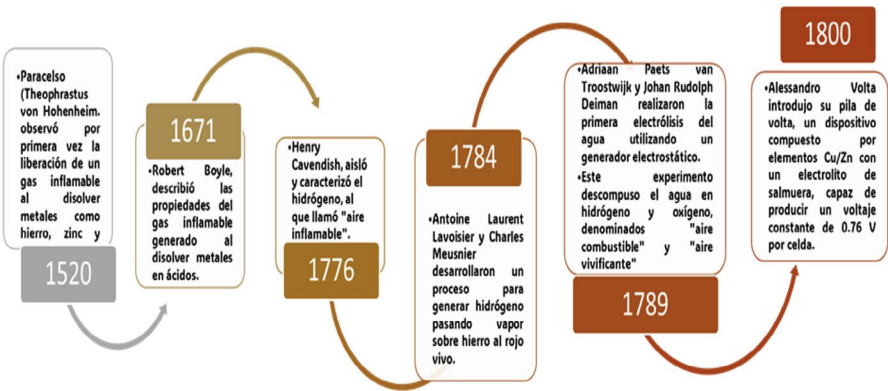
Una breve historia del hidrógeno

El hidrógeno, pese a ser el elemento más ligero y abundante del universo, no se encuentra puro en la Tierra. Siempre está acompañado: en el agua (H₂O), en los hidrocarburos, en compuestos orgánicos. Descubrirlo y entenderlo fue un proceso de siglos.

En 1671, el científico inglés Robert Boyle observó que al mezclar hierro con ácido se desprendía un gas extraño, aunque no lo identificó. Más tarde, en 1766, Henry Cavendish fue el primero en estudiarlo

sistemáticamente. Lo llamó “aire inflamable” porque ardía fácilmente y, al quemarse, producía agua. Lo curioso es que Cavendish no comprendió del todo su importancia, pero dejó la pista que llevaría a un gran avance (IEA, 2021). Ese avance vino de la mano de Antoine Lavoisier, el químico francés que sentó las bases de la nomenclatura moderna. Al analizar el experimento de Cavendish, Lavoisier concluyó que el agua no era un elemento, como se creía en la época, sino un compuesto de oxígeno e hidrógeno. Fue él quien dio al gas su nombre definitivo: *hydro* (agua) y *genes* (generador).

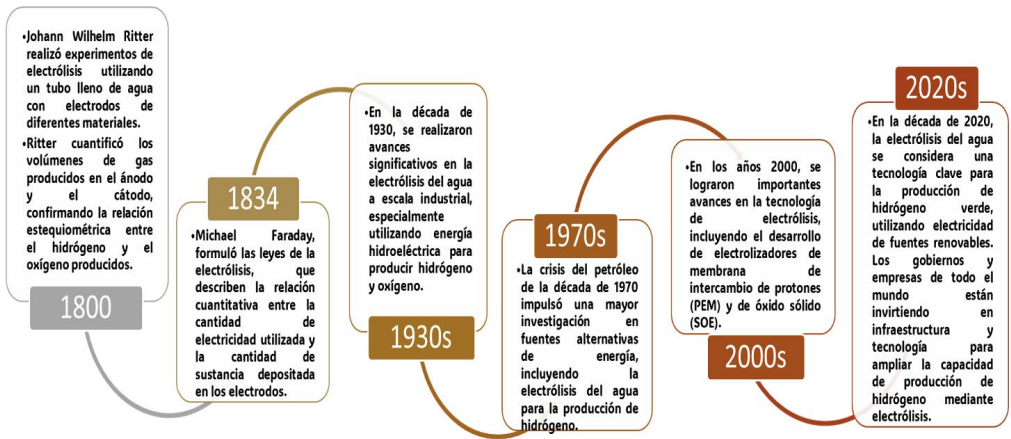
Figura 2. Línea del tiempo de los descubrimientos y avances clave en la producción de hidrógeno, desde Paracelso (1520) hasta Volta (1800). Créditos: Elaboración propia con base en fuentes históricas



Con el descubrimiento de la electricidad, a finales del siglo XVIII y durante el XIX, surgió el experimento que hoy conocemos como electrólisis: colocar dos electrodos en agua conectados a una batería y observar cómo en un extremo aparecen burbujas

de oxígeno y en las otras burbujas de hidrógeno (SLAC National Accelerator Laboratory, 2023). Este fenómeno, que parecía magia, fue la base para tecnologías industriales que más tarde permitieron producir hidrógeno en grandes cantidades.

Figura 3. Línea del tiempo de los descubrimientos y avances en la electrólisis del agua y producción de hidrógeno (1800-2020s).
Créditos: Elaboración propia con base en fuentes históricas



Durante el siglo XX, el hidrógeno tuvo múltiples aplicaciones. Se usó en la industria química para fabricar fertilizantes a través del proceso Haber-Bosch, en la refinación de petróleo y hasta como combustible en misiones espaciales. Sin embargo, no fue hasta inicios del siglo XXI que comenzó a hablarse seriamente de él como vector energético, es decir, como una forma de almacenar y transportar energía limpia.

Hoy, países como Japón, Corea del Sur, Alemania y Australia han hecho del hidrógeno verde una apuesta estratégica para descarbonizar sus economías (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022). La novedad está en que cada vez más investigadores apuntan a una fuente gigantesca: los océanos.

La electrólisis del agua de mar: un café salado

En teoría, la electrólisis es sencilla. Basta con aplicar electricidad al agua y esta se separa en oxígeno e hidrógeno. Pero el agua de mar no es agua pura; es una mezcla de sales, minerales y vida microscópica.

Esto genera problemas importantes:

Corrosión: los cloruros del agua dañan los electrodos metálicos, como si fueran óxido instantáneo.

Subproductos tóxicos: en lugar de oxígeno, en el ánodo puede liberarse cloro gaseoso, que es corrosivo y peligroso.

Ensuciamiento (fouling): microorganismos y partículas se adhieren a las superficies, reduciendo la eficiencia (Pacific Northwest National Laboratory [PNNL], 2023).

Para entenderlo mejor, pensemos en una metáfora: intentar preparar café con agua salada. El café saldrá, sí, pero el sabor será terrible y la cafetera quedará dañada. Así ocurre con los electrolizadores en agua de mar: producen hidrógeno, pero a costa de una eficiencia menor y equipos deteriorados.

De ahí que la gran misión de los científicos sea diseñar nuevos materiales y métodos que permitan superar estas dificultades.

Para entender las implicaciones de usar agua de mar en lugar de agua dulce, a continuación, se presenta una tabla comparativa con las ventajas y desventajas de la electrólisis en ambos tipos de agua:

Tabla 1. Comparación de ventajas y desventajas de la electrólisis en agua dulce y agua de mar.

Aspecto	Electrólisis en agua dulce	Electrólisis en agua de mar
Disponibilidad del agua	Limitada – el agua dulce es un recurso escaso y vital (competencia con consumo humano y agricultura).	Abundante – los océanos cubren ~70% del planeta; uso no compete con agua potable.
Pureza requerida	Requiere agua <i>muy pura</i> (desionizada) para evitar impurezas; a menudo implica pretratamiento (desalinización si se parte de agua salobre). Ventaja: sin sales = proceso más sencillo, sin corrosión por cloruro.	Contiene sales y organismos que afectan el proceso ; es necesario filtrar o desalinizar parcialmente. Desafío: cloruros causan corrosión y generan subproductos tóxicos (ej. cloro gaseoso).
Eficiencia del proceso	Alta – la ausencia de iones no deseados permite una electrólisis más eficiente; se produce únicamente H ₂ (cátodo) y O ₂ (ánodo).	Menor si no se toman medidas – la presencia de iones y fouling puede reducir la eficiencia. Requiere innovaciones (catalizadores resistentes, membranas especiales, AI) para equiparar eficiencia.
Subproductos generados	Oxígeno en el ánodo (no tóxico). Nota: No hay formación de cloro u otros subproductos dañinos.	Posible generación de cloro en el ánodo (tóxico y corrosivo) si no se controla. Se deben incluir sistemas para evitarlo (por ejemplo, materiales catalíticos selectivos o ánodos recubiertos).
Impacto ambiental	Desventaja: consume agua dulce que podría destinarse a otros usos. En regiones áridas, producir mucho hidrógeno verde podría agravar la escasez hídrica.	Ventaja: preserva el agua dulce al usar agua marina. Sin embargo, hay que manejar la salmuera resultante o restos de sal para no dañar ecosistemas marinos.
Costo y viabilidad	Los electrolizadores comerciales están diseñados para agua pura; el costo proviene más de la electricidad renovable que del agua en sí, aunque la purificación añade costo.	Evita costos de purificar grandes volúmenes de agua, pero requiere invertir en tecnologías anticorrosión y de pretratamiento. A largo plazo, podría ser más económico en zonas costeras con abundante sol y viento.

Avances recientes: innovación contra la corrosión

En los últimos años, la investigación ha dado saltos sorprendentes. Los catalizadores avanzados funcionan como una especie de armadura para los electrodos. Son recubrimientos especiales que resisten la corrosión provocada por la sal y, además, hacen que el proceso sea más selectivo, reduciendo la formación de cloro. Dicho de otra forma, ayudan a que el electrolizador se concentre en producir lo que queremos —hidrógeno— y no lo que no queremos —cloro (Xu et al., 2022).

Otra innovación son los electrolizadores híbridos, que incorporan filtros de desalinización. Es como si tuvieran un purificador de agua integrado: limpian parte de las sales antes de que el agua llegue al corazón del proceso, alargando la vida útil de los equipos (SLAC National Accelerator Laboratory, 2023).

Los prototipos solares son quizá los más llamativos. En Cornell University, por ejemplo, se diseñó un dispositivo que usa directamente la energía del sol para producir hidrógeno del agua de mar. Lo extraordinario es que, además de hidrógeno, genera agua potable como subproducto. Una máquina así podría instalarse en zonas costeras para dar al mismo tiempo energía limpia y agua segura (Cornell University, 2025).

La inteligencia artificial también se ha sumado a esta revolución. Algoritmos de aprendizaje automático permiten ajustar el voltaje y la temperatura en

tiempo real, como si un “cerebro digital” estuviera optimizando continuamente el proceso. Así, se aumenta la eficiencia y se evita un desgaste innecesario en los equipos (Xu et al., 2022).

Aunque aún se trata de desarrollos en fase experimental, todos estos avances muestran un camino cada vez más claro: un futuro donde producir hidrógeno del agua de mar será tan normal como hoy lo es producir electricidad de un panel solar.

¿Por qué importa producir hidrógeno del mar?

Las razones son múltiples y se pueden resumir en tres grandes áreas.

Ambientales

El agua de mar es un recurso prácticamente inagotable. Usarla para producir hidrógeno significa no añadir presión a las reservas de agua dulce, ya de por sí amenazadas. Además, el hidrógeno verde puede sustituir combustibles fósiles en sectores de difícil electrificación, como la aviación o la industria pesada, reduciendo significativamente las emisiones de CO₂ (IEA, 2021).

Económicas

Producir hidrógeno cerca de la costa permite aprovechar la proximidad a parques solares y eólicos marinos, reduciendo costos logísticos. Los electrolizadores instalados en puertos o plataformas

podrían generar hidrógeno listo para ser exportado o usado localmente (GEOMAR, 2024).

Geopolíticas

En un mundo donde la seguridad energética es clave, el hidrógeno marino ofrece independencia. Los países costeros pueden producir su propio combustible y, al mismo tiempo, convertirse en exportadores de energía limpia, reduciendo su dependencia de petróleo y gas importados (Good New Energy, 2023).

Mitos y realidades

“El hidrógeno explota fácilmente”. Es cierto que es inflamable, pero también lo son la gasolina o el gas natural. La diferencia es que el hidrógeno se maneja con protocolos de seguridad estrictos que lo hacen igual de seguro que otros combustibles (PNNL, 2023).

“Es demasiado caro”. Hoy cuesta más que el gas o el carbón, pero en la última década su precio ha caído más del 50 % y la tendencia continúa a la baja gracias a la innovación y la producción a gran escala (IEA, 2021).

“Esto es ciencia ficción”. No. Ya existen proyectos piloto en Estados Unidos, China, Japón y Europa que producen hidrógeno directamente del mar (SLAC National Accelerator Laboratory, 2023).

Mirando hacia el futuro

Los próximos 30 años serán decisivos. La IEA (2021) estima que el hidrógeno podría representar el 10 % de la energía mundial en 2050. La IRENA (2022) proyecta que el comercio internacional de hidrógeno será tan relevante como lo es hoy el del petróleo.

De lograrse, veremos un mundo donde los océanos no solo sean fuente de alimentos y biodiversidad, sino también de energía limpia. Es un escenario en el que los puertos funcionarían como centros de producción y exportación de hidrógeno, y en el que los países costeros tendrían un rol protagónico en la transición energética.

Producción de hidrógeno: Impacto potencial en México y en las actividades petroleras del Golfo de México.

México está en una posición estratégica. Con más de 11,000 km de costas y un alto potencial solar y

eólico, el país podría convertirse en un líder regional en la producción de hidrógeno verde a partir de agua de mar (Good New Energy, 2023).

El Golfo de México, epicentro histórico de la industria petrolera mexicana, representa una oportunidad única. Allí donde hoy predominan plataformas que extraen petróleo y gas, podrían instalarse electrolizadores que produzcan hidrógeno directamente del mar.

Los beneficios serían múltiples:

1. Aprovechar infraestructura existente: ductos, terminales portuarias y sistemas de almacenamiento podrían reconvertirse para transportar hidrógeno o derivados como amoníaco.
2. Reducir emisiones en plataformas: el hidrógeno podría sustituir combustibles fósiles en turbinas y compresores, reduciendo la huella de carbono de las operaciones petroleras (PNNL, 2023)
3. Generar desarrollo regional: los estados costeros como Campeche, Tabasco y Veracruz podrían convertirse en polos de innovación y empleo alrededor de la economía del hidrógeno.
4. Competitividad internacional: gracias al T-MEC y a su cercanía con Estados Unidos, México podría exportar hidrógeno hacia el norte y posicionarse como un proveedor estratégico de energía limpia (IEA, 2021).

En resumen, el hidrógeno marino no implica abandonar el petróleo de la noche a la mañana, sino usar el Golfo como un puente hacia un futuro energético más limpio y competitivo.

Preguntas frecuentes

¿El hidrógeno es peligroso? ¿Puede explotar fácilmente?

El hidrógeno es inflamable, al igual que combustibles comunes como la gasolina o el gas natural. Sin embargo, no es más riesgoso si se maneja con protocolos adecuados de seguridad. En la industria, su almacenamiento y transporte se realizan con medidas estrictas, comparables o incluso más rigurosas que las de otros gases combustibles. Además, como es el gas más ligero, se dispersa rápidamente en el aire, reduciendo el riesgo en caso

de fuga. En resumen, con medidas de seguridad apropiadas, el hidrógeno es tan seguro como los combustibles tradicionales (Gasque, 2025).

¿Es muy caro producir hidrógeno verde?

Actualmente, sí es más caro que producirlo a partir de gas natural o que generar electricidad de la red. Sin embargo, sus costos han caído más de un 50% en la última década y siguen disminuyendo. El precio depende del costo de la electricidad renovable y de la escala de producción. Proyectos pioneros como el de la Universidad de Cornell apuntan a que, en 10–15 años, el hidrógeno verde podría producirse por alrededor de 1 USD/kg, un nivel revolucionario para la industria energética (Acosta, 2025).

¿Esta tecnología es ciencia ficción o una realidad cercana?

No es ciencia ficción, sino una realidad en construcción. Existen proyectos piloto en distintos países (EE. UU., China, Japón, Europa) y hasta en plataformas oceánicas (Dinamarca y Francia) donde ya se produce hidrógeno directamente del agua de mar. Aunque la mayoría están en fase de demostración, los expertos estiman que la producción a gran escala podría ser común en las próximas décadas (Good New Energy – Enagás, 2023).

¿Usar agua de mar no dañará el medio ambiente marino?

Los procesos de electrólisis devuelven la mayor parte del agua al océano tras extraer el hidrógeno y el oxígeno. Si se incluye desalinización, se genera salmuera que debe gestionarse de forma controlada para no afectar la vida marina. Dado el tamaño de los océanos, el impacto sería muy bajo si se aplican medidas de dilución y monitoreo ambiental. De hecho, algunos prototipos, como el de Cornell, buscan aprovechar la sal para producir agua potable como subproducto (Acosta, 2025).

¿Qué tan importante será el hidrógeno en la matriz energética futura?

La Agencia Internacional de Energía (IEA) prevé que el hidrógeno represente cerca del 10% de la energía mundial en 2050, mientras que la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) estima que el comercio de hidrógeno podría ser tan relevante como el petróleo en el futuro. Su ventaja es que puede descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada, la aviación o

el transporte marítimo. El hidrógeno verde a partir de agua de mar se perfila como una vía estratégica para alcanzar esa escala global sin comprometer el agua dulce (IRENA, 2022; Gasque, 2025).

Lecturas recomendadas

Para profundizar en el tema, se sugieren las siguientes lecturas y recursos en español, pensados para todo público:

- Acosta, S. (2025). Científicos logran producir hidrógeno verde y agua potable usando solo el sol y el mar. El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com>
- Good New Energy – Enagás. (2023). El agua del mar: un recurso de interés para la producción de hidrógeno renovable. <https://goodnewenergy.enagas.es>
- Andina Link Smart Cities. (2025). Hidrógeno del mar: el nuevo combustible que desafía al agua dulce. <https://andinalinksmartcities.com>
- Gasque, L. (2025). El hidrógeno, energético del futuro. ¿Cómo ves? (UNAM). <https://www.comoves.unam.mx>
- Rifkin, J. (2002). La economía del hidrógeno. Editorial Paidós.

Conclusión

El hidrógeno verde es una de las grandes promesas de la transición energética. Y si logramos producirlo directamente del agua de mar, habremos encontrado una fuente casi infinita de energía limpia. Los retos técnicos aún son grandes: corrosión, subproductos tóxicos, eficiencia y costos. Pero cada año aparecen soluciones más creativas: catalizadores más resistentes, electrolizadores híbridos, prototipos solares y la ayuda de la inteligencia artificial.

Para México, esta oportunidad es doble. Por un lado, modernizar su industria petrolera y reducir su huella de carbono. Por otro, convertirse en exportador regional de hidrógeno verde, aprovechando sus costas y su cercanía con Estados Unidos.

El mar, que nos ha dado alimento y comercio durante siglos, podría ser ahora el motor energético de un futuro sostenible.

Glosario de términos

Catalizador: material que acelera una reacción química sin consumirse.

Cloro gaseoso: gas tóxico que puede formarse como subproducto en la electrólisis.

Corrosión: desgaste o deterioro de metales por efecto de sales y agentes químicos.

Electrólisis: proceso en que el agua se separa en oxígeno e hidrógeno usando electricidad.

Fouling: acumulación de sales y microorganismos que reduce la eficiencia.

Hidrógeno verde: hidrógeno producido con energías renovables.

Membrana: filtro selectivo que deja pasar solo ciertos iones.

Neutralidad de carbono: equilibrio entre emisiones y acciones que las compensan.

Vector energético: sustancia que permite almacenar y transportar energía.

Glosario de abreviaturas y siglas

AEM: Anion Exchange Membrane.

CO₂: dióxido de carbono.

GEOMAR: Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel.

H₂: hidrógeno.

IEA: International Energy Agency.

IRENA: International Renewable Energy Agency.

MDPI: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

O₂: oxígeno.

PEM: Proton Exchange Membrane.

PNNL: Pacific Northwest National Laboratory.

SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell.

SLAC: Stanford Linear Accelerator Center.

hydrogen trade outlook. IRENA. <https://www.irena.org/publications>

Pacific Northwest National Laboratory. (2023, junio). Hydrogen energy in Guam using seawater electrolysis. PNNL News. <https://www.pnnl.gov>

SLAC National Accelerator Laboratory. (2023, abril). Researchers devise new system turning seawater into hydrogen fuel. SLAC News Center. <https://www6.slac.stanford.edu>

Xu, Y., Wang, M., & Zhang, Y. (2022). Advances in seawater electrolysis for hydrogen production. *Energies*, 15(22), 8560. <https://doi.org/10.3390/en15228560>

Fecha de recepción: 5 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación: 20 de noviembre de 2025.

Referencias

Cornell University. (2025, abril). Sunlight and seawater lead to low-cost green hydrogen and clean water. Cornell Chronicle. <https://news.cornell.edu>

GEOMAR. (2024, marzo). Green hydrogen from the ocean. GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research. <https://www.geomar.de>

Good New Energy. (2023, septiembre). Sea water: a resource of interest for renewable hydrogen production. Enagás. <https://goodnewenergy.enagas.es>

International Energy Agency. (2021). The future of hydrogen. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

International Renewable Energy Agency. (2022). Global

Más que luz: el secreto detrás del láser

Aguilar Cruz Félix⁽¹⁾
Flores Gil Aarón⁽¹⁾
Patiño Carachure Cristóbal⁽¹⁾

RESUMEN

Desde su invención en los años 60, el láser ha cambiado silenciosamente el mundo. Aunque para muchos no sea más que “un tipo de luz”, en realidad está presente en más aspectos de nuestra vida de lo que imaginamos: se usa para operar los ojos, transmitir datos por internet, leer códigos de barras, cortar materiales, e incluso en investigaciones avanzadas como la fusión nuclear. Su importancia es comparable a grandes inventos como la máquina de vapor o los microchips. Lo sorprendente es que, a pesar de su enorme impacto, sigue siendo una tecnología poco comprendida fuera del ámbito científico. Por eso es tan necesario comunicar y explicar estos avances, para que todos entendamos que la ciencia no es ajena a nuestra vida diaria, sino una herramienta poderosa que transforma el presente y construye el futuro.

Palabras clave

láser, emisión estimulada, amplificación óptica

ABSTRACT

Since its invention in the 1960s, the laser has silently transformed the world. Although for many it is nothing more than “a type of light,” it is present in more aspects of our daily lives than we imagine:

it is used to perform eye surgery, transmit data over the internet, read barcodes, cut materials, and even in advanced research such as nuclear fusion. Its importance is comparable to major inventions like the steam engine or microchips. Surprisingly, despite its enormous impact, it remains a poorly understood technology outside the scientific realm. Therefore, it is crucial to communicate and explain these advances, ensuring we all understand that science is not removed from our daily lives, but is a powerful tool that transforms the present and builds the future.

Keywords

laser, stimulated emission, optical amplification.

Introducción

Aunque el láser suele asociarse con “una luz intensa”, en realidad es una tecnología basada en principios físicos muy precisos, con impactos directos en la medicina, la industria, las telecomunicaciones y la investigación. En este artículo se ofrece una explicación divulgativa, ordenada y accesible, que permita comprender cómo surgió el láser, qué lo hace diferente de la luz común y cuáles son sus elementos básicos de funcionamiento, apoyándose en ejemplos

⁽¹⁾ Universidad Autónoma del Carmen, Campeche, Calle 56 No. 4 Esq. Avenida Concordia. Col. Benito Juárez C.P. 24180 Ciudad del Carmen, Campeche, México.

y analogías para facilitar su comprensión. Para dar claridad al enfoque del texto, a continuación se presenta la metodología seguida para reunir y organizar la información.

Metodología

Para la elaboración de este artículo de divulgación se realizó una revisión documental a partir de fuentes académicas y de divulgación (libros, capítulos introductorios, artículos de revisión y recursos institucionales) citadas en el apartado de Referencias. La información se seleccionó con base en: (1) confiabilidad de la fuente, (2) claridad explicativa para público general o semiespecializado y (3) relevancia para comprender el fenómeno y sus aplicaciones. Posteriormente, el contenido se organizó de forma progresiva en seis bloques: antecedentes históricos, concepto de luz, diferencias entre luz común y luz láser, componentes del láser, propiedades del haz y tipos de láser, integrando analogías y figuras para apoyar la comprensión. Con este enfoque, se inicia el desarrollo con un recorrido histórico del láser.

En las siguientes secciones se presenta un recorrido progresivo para comprender el láser: primero, su origen histórico; luego, el concepto de luz; después, las diferencias entre la luz común y la luz láser; y finalmente, los elementos que hacen posible su funcionamiento, sus propiedades principales y los

tipos más representativos.

Un poco de historia del láser

La invención del láser marcó un antes y un después en la tecnología moderna, con aplicaciones que abarcan la medicina, la industria, las comunicaciones, la investigación y la defensa.

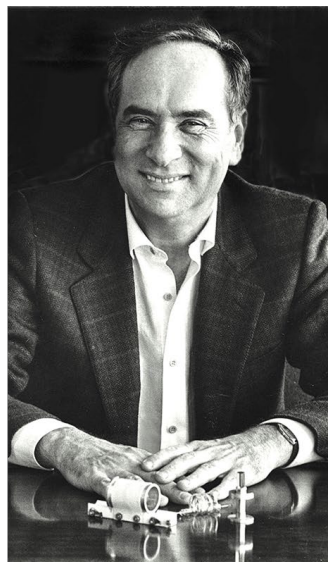
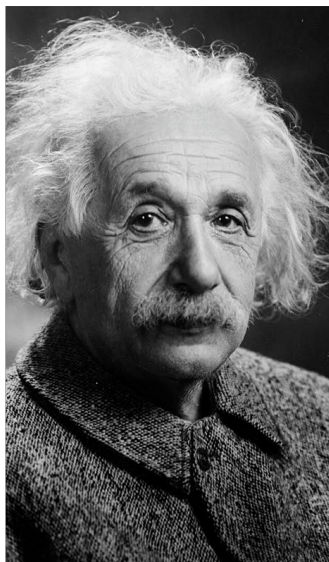
Su origen se remonta a los fundamentos de la mecánica cuántica. En 1901, Max Planck explicó la distribución de energía en los espectros, y Albert Einstein amplió estos conceptos al describir la emisión y absorción cuántica de la luz, idea confirmada en 1928 por Rudolf W. Ladenburg.

Décadas más tarde, Alfred Kastler desarrolló el bombeo óptico —clave para el funcionamiento de los láseres—.

Los científicos Nikolái Bázov y Aleksandr Prójorov estudiaron la inversión de población y crearon los máseres, precursores del láser.

En 1959, Gordon Gould acuñó el término “láser”, siglas de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, y aportó ideas esenciales para su construcción. Finalmente, en 1960, Theodore Maiman logró encender el primer láser funcional, hecho con un cristal de rubí, marcando el inicio de una nueva era tecnológica.

Figura 1. Científicos claves en el desarrollo teórico y práctico del láser: Max Plack, Albert Einstein y Theodore Maiman (Bundesarchiv, ca. 1901; Turner, 1947; Unknown, 1985).



Pero antes de continuar... ¿qué entendemos por luz?

Cuando pensamos en la luz, solemos verla como algo simple: lo que ilumina una habitación, lo que emite una linterna o lo que nos deja ver el mundo. Pero la luz es mucho más fascinante de lo que parece.

En Física, la luz es radiación electromagnética: energía que viaja por el espacio. Y aquí viene lo interesante: según cómo la estudiemos, puede comportarse como onda, como partícula, o como una mezcla de ambas. Esa “doble naturaleza” es uno de los grandes descubrimientos de la ciencia moderna.

Para explicar por qué la luz se refleja, se refracta o puede interferir, no hace falta pensar en misterio: en el siglo XIX, James Clerk Maxwell mostró con sus ecuaciones que la luz es una onda nacida de la interacción entre campos eléctricos y magnéticos.

¿Y qué es una onda? Piensa en una vibración que transporta energía sin trasladar materia. Hay ondas

en el agua, en los sismos y en el sonido. La luz también es una onda, pero con una ventaja única: puede viajar en el vacío, como cuando sale del Sol y llega hasta la Tierra.

Además, según su longitud de onda, esa radiación puede ser luz visible, ultravioleta, microondas o incluso rayos X.

¿Qué hace tan especial a la luz del láser comparada con la luz común?

La imagen de la izquierda representa la luz común: desordenada, con haces que viajan en distintas direcciones, diferentes colores (longitudes de onda) y sin coordinación entre sí, igual que las personas que miran hacia distintos lados y visten con ropa variada. En cambio, la imagen de la derecha ilustra cómo es un haz láser: todos los rayos viajan en la misma dirección, con un solo color y perfectamente sincronizados, como las personas alineadas, con la misma ropa y mirando al mismo punto. Así, la luz común es incoherente, policromática y dispersa, mientras que la luz láser es coherente, monocromática y direccional.

Figura 2. Luz común vs luz láser: mientras la luz común se dispersa en todas direcciones, con distintos colores y sin sincronía, la luz láser avanza alineada, con un solo color y en perfecta coordinación. Adaptado de Anatoliy, 2025.



¿Qué hace que un láser sea un láser?

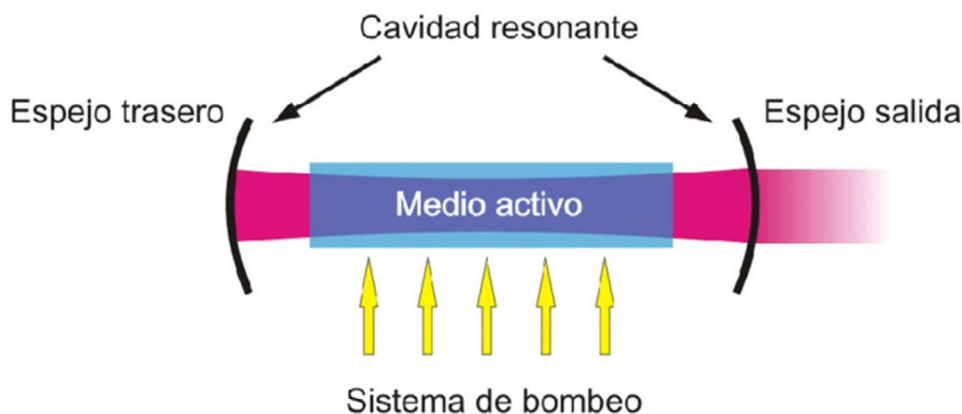
Todo láser necesita tres componentes esenciales para funcionar, sin importar su tamaño. Primero, está el medio activo, que es el corazón del láser. Es el encargado de producir la luz cuando sus átomos o moléculas son excitados. Este material puede ser un gas, un sólido, un líquido o incluso un semiconductor.

Pero para que ese medio pueda generar luz láser, necesita una fuente de energía. Aquí entra el

bombeo, un proceso que "alimenta" al medio activo con la energía necesaria, como si lo cargara para que pueda liberar fotones de forma controlada. Esta energía puede venir de una corriente eléctrica, otra fuente de luz o una reacción química.

Por último, está la cavidad resonante, una especie de "sala de espejos" donde la luz rebota una y otra vez entre dos superficies reflectantes. Este espacio permite amplificar la luz de forma ordenada y coherente hasta que finalmente sale del láser como un haz fino, intenso y muy especial.

Figura 3. Componentes fundamentales de un láser (Moreira, 2012).



El medio activo: el corazón del láser

Si pensamos en el láser como una orquesta, el medio activo sería su corazón: el lugar donde nace la luz. Sin él, por más tecnología o espejos que hubiera, no habría nada que amplificar.

Pero ¿qué es exactamente este componente clave? Se trata de un material especial con una propiedad fascinante: cuando recibe energía, sus átomos o moléculas se "excitan", es decir, saltan a un estado de mayor energía. Al regresar a su estado original, liberan esa energía en forma de fotones, las partículas que componen la luz.

Por ejemplo, según el tipo de láser, el medio activo varía: en el helio-neón es una mezcla de gases, en el de rubí un cristal, y en los diodos un chip semiconductor. Aunque distintos, todos cumplen la misma misión: generar la luz que luego será amplificadas de forma coherente.

El bombeo: encendiendo el láser desde adentro

Imagina que quieres mantener una fuente de luz muy especial funcionando, pero para hacerlo necesitas mantener a muchas partículas "energizadas", como si estuvieran cargadas de emoción y listas para actuar. Esa es la misión del bombeo en un láser: mantener al sistema en un estado especial llamado inversión de población, donde más átomos están excitados (con energía alta) que en reposo (energía baja).

Esto no ocurre de forma natural. Es como si quisieras mantener a más personas bailando en una fiesta que sentadas en sus sillas: sin música o

estímulo, todos terminan volviendo a sus asientos. De la misma forma, los átomos tienden a regresar a su estado inicial liberando energía (luz), y si no los sigues animando, el espectáculo se acaba. Por eso se necesita un mecanismo externo que los mantenga activos. Ese mecanismo es el bombeo.

Existen varias formas de bombear energía: algunos láseres usan electricidad (como los semiconductores), otros usan luz (lo que se conoce como bombeo óptico), e incluso hay sistemas que emplean reacciones químicas o descargas eléctricas. No importa el método: todos tienen en común que deben ser lo suficientemente eficaces como para mantener constante la inversión de población, compensando las pérdidas naturales del sistema.

Sin ese "empuje" continuo, el láser no podría sostenerse: lo que comienza como un medio capaz de amplificar luz acabaría absorbiéndola. Por eso, el bombeo no es solo una etapa más: es el motor invisible que mantiene al láser encendido.

La cavidad resonante: afinando y enfocando la luz láser

Aunque ya tenemos los ingredientes principales para un láser (un material capaz de amplificar la luz y un sistema que le da energía), aún no es suficiente para crear un haz láser real. ¿Por qué? Porque no basta con tener luz amplificadas: queremos que esa luz tenga una frecuencia muy precisa (como una nota musical bien afinada) y que además sea muy intensa (como un foco que deslumbra). Para lograr ambas cosas, los científicos usan una idea tan simple como genial: poner el material activo dentro de una cavidad con dos espejos enfrentados.

Imagina que tienes un pasillo largo con dos puertas de cristal en los extremos. Una es completamente cerrada, la otra tiene una pequeña rendija. Si tiras una pelota bien derechita, va a rebotar entre las dos puertas muchas veces; si la tiras torcida, se irá por un lado y saldrá del pasillo. Lo mismo le pasa a la luz: al entrar en esta especie de “pasillo de espejos”, solo los rayos que van bien rectos logran quedarse rebotando. Cada rebote hace que la luz se fortalezca, como si diera vueltas ganando velocidad. Y cuando ya está bien “cargada”, una parte logra salir por esa pequeña rendija, formando el haz láser. Además, este pasillo no deja pasar cualquier tipo de luz: es como si solo permitiera entrar a personas con una altura exacta, rechazando a las que no encajan. Así, la cavidad selecciona solo ciertos “colores” o tipos de luz muy específicos, descartando los que sobran. En conjunto, la cavidad funciona como un filtro, un pasillo de aceleración y un embudo: ordena, refuerza y enfoca la luz. Por eso es tan importante: sin ella, el láser no tendría dirección, ni precisión, ni potencia.

¿Qué hace tan especial a la luz láser?

La luz láser no es simplemente “más intensa” o “más brillante” que otras luces: tiene propiedades únicas que la hacen muy distinta a la luz de una bombilla o del sol. Esto se debe a la forma en que se genera, especialmente por un proceso llamado emisión estimulada, que crea fotones (partículas de luz) idénticos entre sí. Es como si salieran todos del mismo molde. Gracias a eso, el láser tiene tres características fundamentales: coherencia, direccionalidad, monocromaticidad y polarización.

Coherencia

Imagina un grupo de personas aplaudiendo. En un concierto, cada uno aplaude a su ritmo: eso sería como la luz común, donde las ondas van desordenadas, cada una con su propio “compás”. En cambio, en un láser, todos los fotones aplauden al mismo tiempo y en perfecta sincronía. Eso es la coherencia: las ondas de luz están alineadas en fase, avanzan con el mismo ritmo y dirección. Esta propiedad es clave en muchas aplicaciones, desde medir distancias con láser hasta realizar cirugías precisas.

Direccionalidad

La luz láser no se dispersa hacia todos lados como la de una linterna o una lámpara. Va directamente hacia un punto, como si fuera una flecha de luz. Esto ocurre gracias a la cavidad con espejos donde

se forma el láser, que solo permite que la luz se amplifique si viaja perfectamente alineada. Es como si solo pudieras ganar velocidad en una pista de carreras si vas exactamente recto; si te sales de la línea, te frenan. Esta dirección precisa permite que el láser se use para cortar materiales, apuntar con exactitud, o enviar información a largas distancias sin perderse.

Monocromaticidad

Monocromático puede sonar complicado, pero solo significa que el láser emite luz de un solo “color” o longitud de onda. Mientras una bombilla o el Sol producen luz blanca —mezcla de muchos colores—, el láser es como un marcador de tinta pura: genera casi exclusivamente un tipo de luz. Todos sus fotones son iguales, lo que le da esa pureza. Existen también láseres diseñados para emitir varios colores, como los que producen pulsos ultrarrápidos, aunque son casos especiales.

Polarización

Aunque no es una propiedad automática del láser, suele ocurrir que su luz también está polarizada, es decir, que vibra en una sola dirección. Es como si sacudieras una cuerda solo de arriba abajo y no en todas direcciones. Esto se logra usando ciertos componentes ópticos dentro del láser, como ventanas especiales que dejan pasar solo la luz con la orientación adecuada. En contraste, la luz común, como la de una lámpara, vibra en todas las direcciones posibles y sin orden.

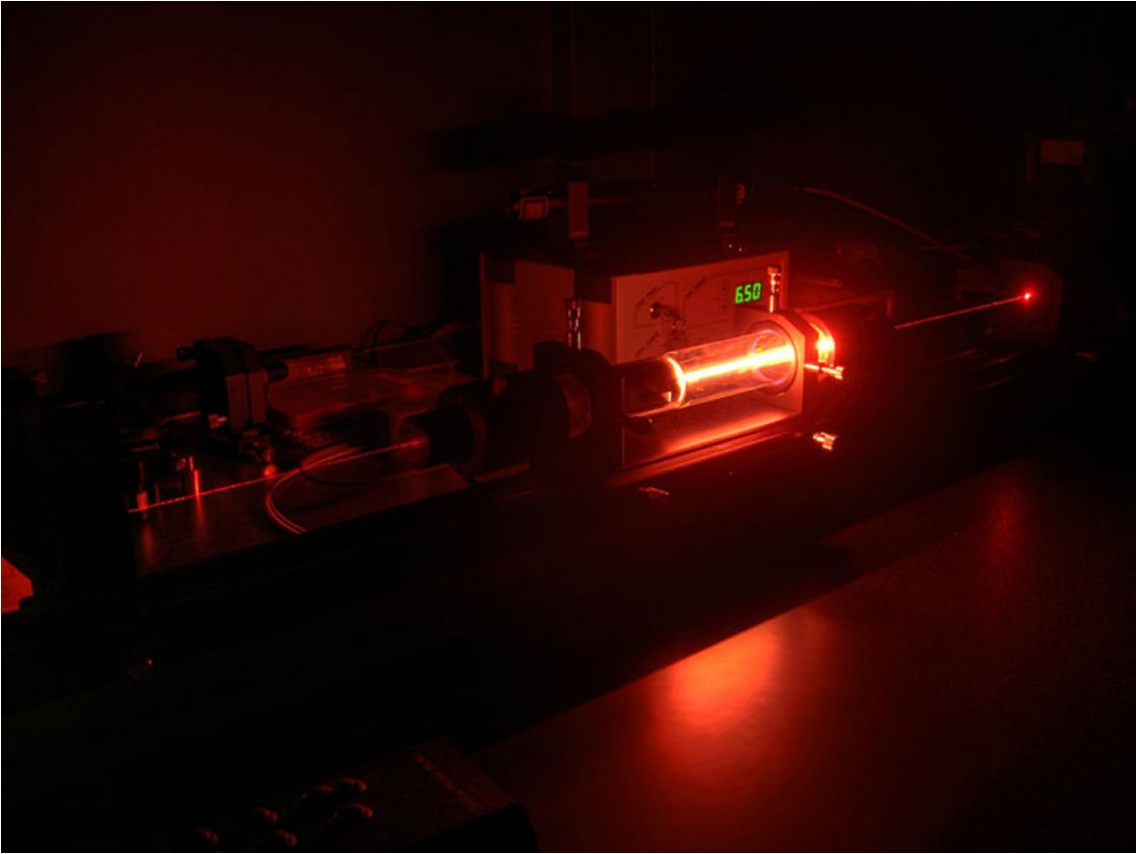
Tipos de láser: gas, sólido y semiconductor – ¿cuál es la diferencia?

Todos los láseres funcionan bajo el mismo principio científico, pero no todos son iguales. El “corazón” de cada láser —su medio activo— puede ser tan diferente como el aire, una piedra preciosa o incluso un microchip.

Láseres de gas: los artistas de la precisión

Imagina un tubo con gases que brillan como un letrero de neón: así funcionan los láseres de gas, donde una descarga eléctrica excita los átomos. El clásico láser de helio-neón, con su rayo rojo, es ideal para laboratorios y alineaciones precisas. Su contraparte más potente, el láser de CO₂, domina en talleres gracias a su haz invisible capaz de cortar metales o grabar madera con gran exactitud. Ambos destacan por ofrecer haces de calidad excepcional.

Figura 4. Láser de gas Helio-neón (Marks, 2009).

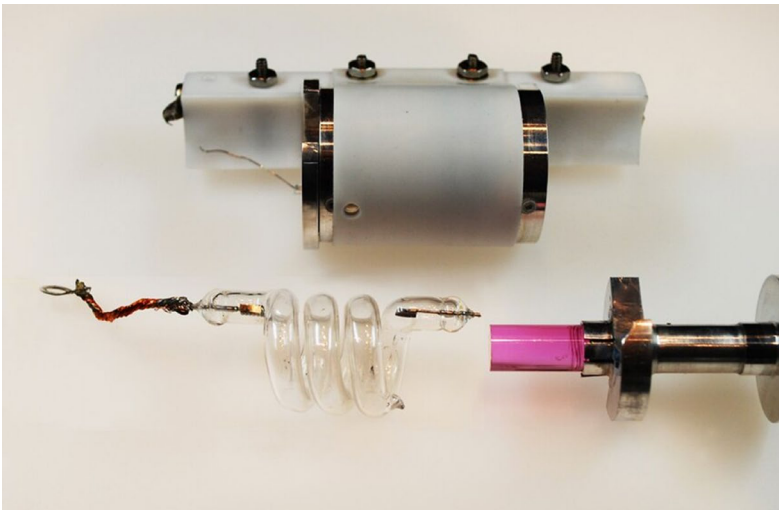


Láseres de estado sólido: los poderosos

Aquí el medio activo es un cristal o vidrio especial "dopado" con iones metálicos. El láser de rubí (el primero de la historia) produce pulsos rojos intensos, mientras que el Nd:YAG moderno puede

emitir luz infrarroja continua o pulsada. Son los favoritos de cirujanos (para operar sin sangrado), industriales (para soldar metales) e incluso del ejército. Necesitan una lámpara flash o otro láser para "activarse", pero a cambio ofrecen potencia y versatilidad incomparables.

Figura 5. Láser de estado sólido de Rubí original (Immega,2010).



Láseres semiconductores: los omnipresentes

¡Probablemente tienes varios en casa! Estos diminutos láseres (del tamaño de un grano de sal) están en tu lector de DVD, la impresora láser y hasta en el escáner del supermercado. Funcionan

como chips electrónicos que emiten luz cuando pasa corriente. Aunque menos potentes, ganan por su miniaturización, bajo costo y eficiencia energética. Son los responsables de que la tecnología láser esté en todas partes hoy día.

Figura 6. Láser semiconductor (Electroagenda, s.f.).



Conclusiones

El futuro del láser es tan prometedor como deslumbrante. Científicos e ingenieros siguen explorando nuevos materiales y formas de hacerlo más eficiente, preciso y potente. Todo apunta a que el láser seguirá evolucionando, con aplicaciones cada vez más sorprendentes. Sin duda, esta luz especial seguirá marcando el rumbo de la tecnología en los años por venir.

Más allá de su impacto actual, el láser representa una muestra clara de cómo la ciencia y la tecnología avanzan cuando se combinan la curiosidad humana con la investigación rigurosa. En ese sentido, no solo ilumina objetos: ilumina también el camino hacia un futuro lleno de innovación, descubrimientos y nuevas posibilidades.

Referencias

- Alonso Fernández, B., Borrego Varillas, R., Hernández García, C., Pérez Hernández, J. A., & Romero Vázquez, C. (Eds.). (2011). El láser, la luz de nuestro tiempo. Grupo OSAL; Universidad de Salamanca; Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos (CLPU).
- Anatoliy. (2025). Many people wearing 3D glasses [Ilustración digital]. Unsplash. https://unsplash.com/illustrations/many-people-wearing-3d-glasses-_wMjIgTF7E
- Berboucha, M. (2019, 28 de marzo). A brief history of the ruby laser. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/meriamberboucha/2019/03/28/a-brief-history-of-the-ruby-laser/>
- Bundesarchiv. (ca. 1901). Max Planck [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bundesarchiv_

- Bild_183-R0116-504_Max_Planck.jpg
- Chrysosouris, G. (1991). Lasers for machining. En *Laser machining* (pp. 17–46). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4084-4_2
- Electroagenda. (s.f.). Láser semiconductor. Electroagenda. <https://electroagenda.com/es/laser-semiconductor>
- Immega, G. (2010, 16 de mayo). Components of original ruby laser [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:5_Maiman_Laser_Components.jpg
- Khalkhal, E., Rezaei-Tavirani, M., Zali, M. R., & Akbari, Z. (2019). The evaluation of laser application in surgery: A review article. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 10(4), 104–111. <https://doi.org/10.15171/JLMS.2019.S18>
- Love, A. (2018). Introduction to laser physics. En *Laser physics* (pp. 5–13). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93970-4_2
- Maini, A. K. (2013). *Lasers and optoelectronics: Fundamentals, devices and applications*. Wiley India Pvt. Ltd.
- Markstein, T. (2009, 16 de diciembre). Helium-neon laser in operation [Fotografía]. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Henelaser.jpg>
- Moreira Osorio, L., Ponce Cabrera, L. V., & de Posada, E. (2012). Descubriendo la materia mediante luz láser: La espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) como método para determinar la composición elemental de la materia. Editorial Académica Española.
- Mr Beam. (s.f.). ¿Qué es un láser de estado sólido? Mr Beam. <https://www.mr-beam.org/es-es/blogs/news/que-es-un-laser-de-estado-solido>
- Phipps, C. R. (2003). Overview of laser applications: The state of the art and the future trend. *Proceedings of SPIE*, 4830, 1–10. <https://doi.org/10.1117/12.486517>
- Rao, M. C. (2013). A brief introduction to lasers and applications: Scientific approach. *Research Journal of Material Sciences*, 1(2), 20–24. International Science Congress Association.
- Ready, J. F. (1978). Fundamentals of lasers. En *Applied laser physics* (pp. 4–32). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-583960-0.50007-1>
- Ready, J. F. (1997). Fundamentals of lasers. En *Applied laser physics* (pp. 1–30). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012583961-7/50003-X>
- Solymár, L., Walsh, D. D., & Syms, R. R. A. (2024). Lasers. En *Principles of photonics* (pp. 370–422). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/9780198921004.003.0012>
- Stickley, C. M. (1964). *Applications of lasers*. Defense Technical Information Center.
- Thyagarajan, K., & Ghatak, A. K. (1980). *Lasers: Theory and applications*. Plenum Press.
- Turner, O. J. (1947). Albert Einstein [Fotografía]. Library of Congress / Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_1947.jpg
- Unknown author. (1985, mayo). Theodore Maiman with the first laser [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maiman_with_the_first_laser.jpg
- Zayhowski, J. J., & Kelley, P. L. (n.d.). *Laser physics*. En *Encyclopedia of applied physics*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/3527600434.eap191>

Fecha de recepción: 5 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación: 3 de diciembre de 2025.

