

Síntesis y aplicación de nanopartículas de Ag/ZnO para el desarrollo de un limpiador photocatalítico y antimicrobiano en textiles.

Sergio Adán Bojórquez Chávez ^a., Ximena Baldenebro Osornio ^b., Oscar Andrick Castillo Sánchez ^c., Cesar Cernas López ^d., Dr. Guillermo Amaya Parra ^e.

^a Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, sergio.bojorquez@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California, México.

^b Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, ximena.baldenebro@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California, México.

^c Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, andrick.castillo@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California, México.

^d Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, cesar.lopez@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California, México.

^e Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, amaya@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California, México.

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de un limpiador antimicrobiano y photocatalítico en atomizador, basado en una solución de nanopartículas de plata y óxido de zinc (Ag/ZnO). Este producto está diseñado para la limpieza y protección de superficies textiles, tanto orgánicas (algodón) como sintéticas (poliéster), mediante la degradación de manchas a través de su actividad photocatalítica y la eliminación de microorganismos a través de la acción antimicrobiana de la plata. Se presenta el proceso de formulación del limpiador, la síntesis de nanopartículas, los mecanismos de acción de los componentes y los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio. Los resultados experimentales demuestran que el producto es efectivo en la degradación de colorantes sintéticos y naturales como azul de metileno, rojo amaranto y manchas de origen graso. Además, la solución no altera la estructura de las fibras textiles, a diferencia de los limpiadores convencionales. Esta investigación representa una innovación en el mercado de productos de limpieza textil, ofreciendo una alternativa más segura y eficiente para la eliminación de manchas y microorganismos.

Palabras clave: Fotocatálisis, Nanopartículas de plata, Nanopartículas de óxido de zinc, Limpieza textil, Antimicrobiano.

Abstract

The present work describes the development of an antimicrobial and photocatalytic spray cleaner based on a solution of silver nanoparticles and zinc oxide (Ag/ZnO). This product is designed for the cleaning and protection of textile surfaces, both organic (cotton) and synthetic (polyester), by degrading stains through its photocatalytic activity and eliminating microorganisms through the antimicrobial action of silver. The formulation process of the cleaner, the synthesis of nanoparticles, the mechanisms of action of the components

and the results obtained in laboratory tests are presented. Experimental results show that the product is effective in the degradation of synthetic and natural dyes such as methylene blue, amaranth red and fatty stains. In addition, the solution does not alter the structure of textile fibers, unlike conventional cleaners. This research represents an innovation in the textile cleaning products market, offering a safer and more efficient alternative for the removal of stains and microorganisms.

Keywords: Photocatalysis, Silver nanoparticles, Zinc oxide nanoparticles, Textile cleaning, Antimicrobial.

1. INTRODUCCIÓN

La industria textil es una de las principales responsables de la contaminación del agua debido al uso extensivo de colorantes sintéticos. Estos compuestos, utilizados para teñir telas y otros productos, son altamente estables y difíciles de degradar, lo que genera un impacto ambiental significativo. Los efluentes de las fábricas textiles suelen contener altas concentraciones de colorantes azoicos y otros contaminantes orgánicos, que afectan la calidad del agua y ponen en riesgo la vida acuática y la salud humana [1].

Para mitigar este problema, se han desarrollado diversas estrategias, entre ellas la fotocatálisis heterogénea [2]. Este proceso, basado en la activación de materiales semiconductores como el óxido de zinc (ZnO) mediante luz ultravioleta (UV), permite la generación de especies reactivas de oxígeno capaces de degradar contaminantes orgánicos en compuestos inocuos. La fotocatálisis ha demostrado ser una herramienta efectiva en la eliminación de colorantes en cuerpos de agua contaminados, ofreciendo una alternativa sostenible y de bajo costo frente a los métodos convencionales de tratamiento [3].

Sin embargo, a pesar de los avances en la eliminación de colorantes en aguas residuales, el problema de las manchas persistentes en textiles sigue siendo un desafío. Muchas sustancias utilizadas en la industria textil pueden impregnar las fibras y ser difíciles de eliminar con los limpiadores convencionales. Esto no solo afecta la apariencia y calidad de las prendas, sino que también puede favorecer la proliferación de microorganismos.

En este contexto, la aplicación de materiales photocatalíticos en productos de limpieza textil representa una solución innovadora. El presente estudio evalúa la eficacia de un limpiador en atomizador basado en nanopartículas de plata (AgNPs) y óxido de zinc (ZnO) para la eliminación de manchas y la descontaminación de textiles. Este limpiador combina la acción photocatalítica del ZnO con la actividad antimicrobiana de la plata, proporcionando una alternativa segura y eficiente para el cuidado de textiles. La contaminación de textiles por manchas y microorganismos representa un desafío importante en la industria del mantenimiento y cuidado de prendas. El uso de productos químicos agresivos puede dañar las fibras textiles y generar

residuos tóxicos. En este contexto, la nanotecnología ofrece soluciones innovadoras, como el uso de nanopartículas de plata y óxido de zinc, que poseen propiedades antimicrobianas y fotocatalíticas respectivamente.

Las ventajas que presenta el Ag/ZnO sobre un fotocatalizador de referencia como Ag/TiO₂. En principio son una mayor absorción en el espectro visible donde el ZnO, dopado con Ag, puede mejorar la absorción en el rango visible en comparación con TiO₂, lo que permite una mayor eficiencia bajo luz solar o iluminación artificial convencional. Otro punto es el menor costo y disponibilidad, donde el ZnO es un material más económico y accesible que el TiO₂, lo que lo hace atractivo para aplicaciones comerciales.

Así mismo las propiedades antibacterianas adicionales donde la presencia de Ag en ZnO proporciona un efecto antimicrobiano adicional, lo que es beneficioso en aplicaciones textiles donde la eliminación de microorganismos es deseada.

Finalmente la estructura y morfología ajustable donde el ZnO permite un mayor control sobre la morfología de las nanopartículas, lo que puede influir en su desempeño fotocatalítico y adhesión a superficies textiles. En este estudio, se evaluó la eficacia de un limpiador basado en Ag/ZnO para la eliminación de manchas y la descontaminación de superficies textiles.

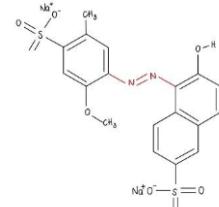
2. CONTENIDO

2.1 Colorantes y su impacto ambiental

Los colorantes son compuestos químicos ampliamente utilizados en la industria textil, alimentaria y cosmética para proporcionar tonalidades específicas a diversos productos. Se clasifican en dos grandes grupos: naturales y sintéticos. Los colorantes naturales provienen de fuentes orgánicas como plantas, insectos o minerales, mientras que los colorantes sintéticos, derivados del petróleo, ofrecen una mayor estabilidad y durabilidad en aplicaciones industriales [4].

Entre los colorantes sintéticos, los colorantes azoicos representan la mayor parte de los colorantes utilizados en la industria textil. Estos compuestos se caracterizan por la presencia de uno o más grupos azo (-N=N-) en su estructura, lo que le confiere una gran estabilidad química y resistencia a la degradación [Fig. 1]. Sin embargo, su persistencia en el medio ambiente y su potencial toxicidad, especialmente cuando se degradan en compuestos aromáticos cancerígenos, los convierten en una preocupación ambiental significativa [1][5].

Figura 1. Molécula de rojo allura (colorante AZO)



Fuente: Elaboración propia

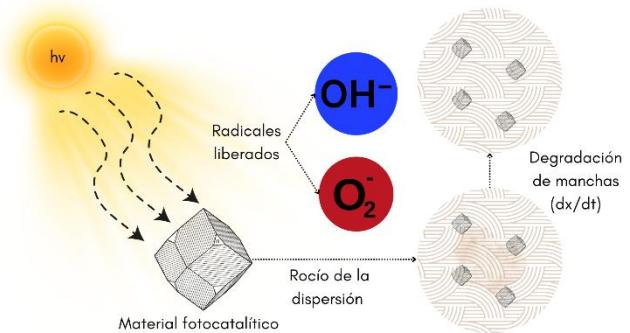
Los efluentes de la industria textil que contienen colorantes azoicos pueden contaminar cuerpos de agua, afectando la fotosíntesis de organismos acuáticos y generando riesgos para la salud humana debido a su bioacumulación [1]. Debido a esto, se han buscado métodos eficientes y sostenibles para la remoción de estos contaminantes del agua.

2.2 Fotocatálisis y su aplicación en la remoción de colorantes

La fotocatálisis heterogénea es un proceso avanzado de oxidación en el que un material semiconductor, conocido como fotocatalizador, es activado por la luz para generar especies reactivas de oxígeno (ROS). Estas ROS pueden descomponer compuestos orgánicos complejos, como los colorantes, en moléculas más simples y no tóxicas [6-8].

El mecanismo de la fotocatálisis involucra la excitación del fotocatalizador por radiación UV o visible, promoviendo electrones de la banda de valencia a la banda de conducción y generando pares electrón-hueco. Estos huecos pueden reaccionar con el agua y el oxígeno, formando radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) altamente reactivos, que son responsables de la degradación de los contaminantes [Fig. 2] [8-9].

Figura 2. Proceso fotocatalítico



Fuente: Elaboración propia

2.3 Óxido de zinc (ZnO) como fotocatalizador

El ZnO es un fotocatalizador ampliamente estudiado debido a su alta actividad, bajo costo y estabilidad química. Su amplio band gap (3.2 eV) le permite absorber radiación UV para generar radicales hidroxilos y otras especies reactivas

[3]. Diversos estudios han demostrado que el ZnO es eficaz en la degradación de colorantes como azul de metileno, rojo amaranto y tartrazina, alcanzando eficiencias de remoción superiores al 80% en tiempos de exposición a luz UV de aproximadamente 120 minutos [7-10-11].

Las ventajas del ZnO incluyen su facilidad de síntesis, biocompatibilidad y capacidad de ser reutilizado en múltiples ciclos de reacción. Sin embargo, su limitación principal radica en su rápida recombinación electrón-hueco, lo que reduce su eficiencia catalítica [12]. Para superar este inconveniente, se han desarrollado estrategias como la dopado con metales y la combinación con nanopartículas de plata.

2.4 Nanopartículas de plata (AgNPs) y su sinergia con ZnO

Las nanopartículas de plata han sido ampliamente utilizadas por sus propiedades antimicrobianas, catalíticas y ópticas. Su actividad biocida se debe a la liberación de iones Ag⁺, que interfieren en procesos celulares bacterianos, inhibiendo su crecimiento y proliferación. Estas propiedades han permitido su aplicación en medicina, desinfección de superficies y purificación de agua [13].

La combinación de AgNPs con ZnO genera una sinergia que mejora la eficiencia fotocatalítica del sistema. La presencia de AgNPs actúa como un trampolín de electrones, reduciendo la recombinación electrón-hueco y aumentando la generación de especies reactivas de oxígeno. Esto permite una degradación más eficiente de colorantes y otros contaminantes orgánicos [14].

2.5 Formulación del limpiador

Se preparó una solución acuosa con los siguientes componentes:

- **Nanopartículas de plata (AgNPs):** 0.01-0.05% en peso.
- **Nanopartículas de óxido de zinc (ZnO-NPs):** 0.1-0.5% en peso.
- **Dispersantes (PEG o quitosano):** 0.05-0.1%.
- **Agua destilada** como vehículo principal (>90% del volumen total).
- **Etanol** como vehículo secundario (<10% del volumen total)

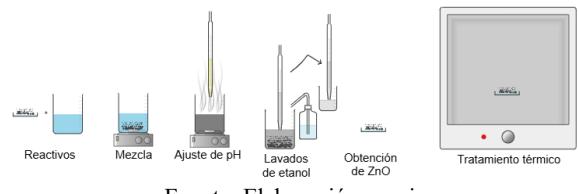
2.6 Síntesis de nanopartículas

Nanopartículas de plata: Se sintetizaron mediante la metodología reportada en Martinez (2015), se realizó por medio de reducción química de nitrato de plata (AgNO₃) usando ascorbato de sodio como reductor y citrato de sodio como estabilizador.

Nanopartículas de ZnO: Se sintetizaron mediante el método de coprecipitación química, utilizando nitrato de zinc (Zn(NO₃)₂) como precursor y NaOH como agente

precipitante. Se optó por este método para favorecer la obtención de tamaños homogéneos [Fig. 3].

Figura 3. Metodología de síntesis de ZnO



Fuente: Elaboración propia

2.7 Pruebas

Las pruebas en reactores UV-Vis demostraron que la formulación degradada eficientemente colorantes como azul de metileno y rojo amaranto, alcanzando hasta un 90% de reducción en 80 minutos [Fig. 4]. La acción antimicrobiana de las AgNPs fue validada mediante ensayos microbiológicos en textiles contaminados, observándose una disminución significativa en la carga bacteriana.

Figura 4. Degradación de colorante tipo “azo” en fotorreactor

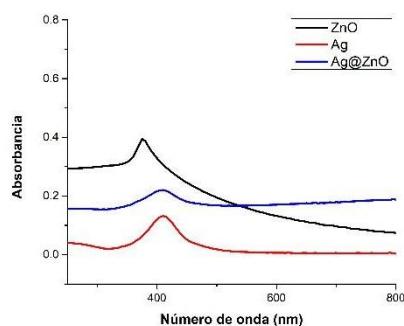


Fuente: Fotografía propia

2.8 Resultados

Al analizar las nanopartículas sintetizadas se obtuvieron resultados apegados a los reportados en la literatura, obteniendo actividad fotocatalítica dentro del rango visible, brindada por la propia composición del ZnO y el plasmón de superficie de las AgNPs [Fig. 5]. De esta manera se potenció la actividad fotocatalítica del ZnO ampliando el rango en el que originalmente trabaja el ZnO.

Figura 5. Espectro de absorbancia de los materiales Ag, ZnO y Ag@ZnO

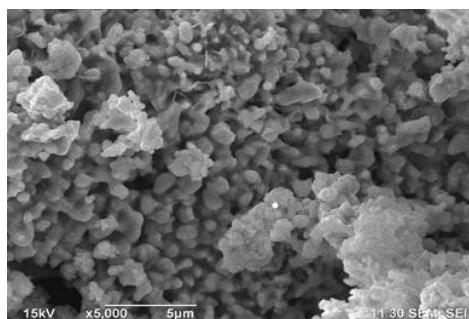


Fuente: Elaboración propia

No se espera que el fotocatalizador Ag/ZnO degrade significativamente el algodón y el poliéster durante el proceso photocatalítico. La degradación photocatalítica generalmente ocurre en presencia de compuestos orgánicos con enlaces susceptibles a la acción de los radicales generados, como los colorantes y algunos microorganismos. Sin embargo, tanto el algodón como el poliéster tienen estructuras relativamente resistentes a la degradación bajo las condiciones de photocatálisis utilizadas para la eliminación de contaminantes. Aun así, estudios adicionales sobre la estabilidad de los materiales textiles tratados con Ag/ZnO serían necesarios para confirmar la ausencia de efectos adversos a largo plazo.

Además, se analizó la estructura obtenida del composito obtenido al final Ag/ZnO por medio de SEM obteniendo además una distribución bastante homogénea de tamaño [Fig. 6].

Figura 6. Micrografía SEM de nanopartículas de Ag/ZnO

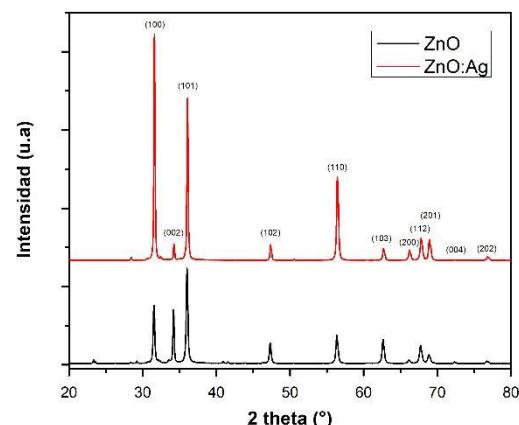


Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realizó un análisis por difracción de rayos X [Fig. 7], gracias a ello se determinó el tamaño del cristal aplicando la ecuación de Scherrer:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

Figura 7. Difractograma de nanopartículas de Ag/ZnO y ZnO



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Análisis de muestras por Origin para obtener ancho a media altura (FWHM) del pico de difracción en radianes.

Dataset Identifier	Peak ID	Peak Row	Peak X	Peak Y	Height	Peak Area	FWHM
Peak Height from Baseline							
1	ZnO:Ag	Peak 1	573	31.5973	58089	57057.10493	12146.48911
2	ZnO:Ag	Peak 2	794	36.0779	41813	41032.29039	9772.36403
3	ZnO:Ag	Peak 3	1797	56.4128	21713	20397.9573	6316.04751
4	ZnO	Peak 1	570	31.5365	15165	13900.81242	3719.6796
5	ZnO	Peak 2	701	34.1924	14140	13009.61236	2732.99117
6	ZnO	Peak 3	791	36.0171	24670	23826.23125	7307.82709
7	ZnO	Peak 4	1348	47.3098	5606	5318.6708	1989.41464
8	ZnO	Peak 5	1795	56.3723	7509	6408.3491	1973.76422
9	ZnO	Peak 6	2104	62.637	6473	5435.36271	1729.46777
10	ZnO	Peak 7	2355	67.7258	4971	3349.79045	983.78433

Fuente: Elaboración propia en Origin.

Los tamaños de cristal calculados para el ZnO puro utilizando la ecuación de Scherrer y los valores de FWHM [Fig. 8] son los siguientes (en nanómetros):

- Pico a 31.54°: 34.32 nm
- Pico a 34.19°: 43.05 nm
- Pico a 36.02°: 32.56 nm
- Pico a 47.40°: 30.81 nm
- Pico a 56.37°: 30.04 nm
- Pico a 62.64°: 28.69 nm
- Pico a 67.73°: 30.95 nm

El tamaño de cristal promedio para ZnO puro es de aproximadamente 32.92 nm. Para los tamaños de cristal calculados para ZnO dopado con Ag (ZnO:Ag) son:

- Pico a 31.60°: 44.95 nm
- Pico a 36.08°: 40.97 nm
- Pico a 56.41°: 45.74 nm

El tamaño de cristal promedio para ZnO:Ag es aproximadamente 43.89 nm. Se observa que el dopaje con Ag ha incrementado el tamaño de cristal en comparación con el ZnO puro, lo que sugiere una posible mejora en la cristalinidad o reducción de defectos estructurales.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el limpiador en atomizador basado en nanopartículas de plata y óxido de zinc representa una alternativa efectiva y sostenible para la limpieza y descontaminación de textiles. La combinación de ZnO y AgNPs permite aprovechar las propiedades fotocatalíticas del óxido de zinc para la degradación de manchas orgánicas y la acción antimicrobiana de la plata para la eliminación de microorganismos.

Los ensayos de degradación de colorantes como azul de metileno y rojo amaranto evidenciaron que la fotocatálisis con ZnO es capaz de reducir significativamente la concentración de estos compuestos en tiempos relativamente cortos, bajo exposición a luz UV.

A diferencia de los limpiadores convencionales que emplean agentes químicos agresivos, la formulación desarrollada mantiene la integridad de las fibras textiles y evita efectos secundarios perjudiciales, haciéndola adecuada para el uso en prendas de vestir, muebles y otros textiles de uso cotidiano.

Como perspectiva futura, se recomienda evaluar el desempeño del limpiador en condiciones de luz visible para optimizar su uso en ambientes interiores. Además, sería conveniente explorar su efectividad en distintos tipos de manchas y su estabilidad a largo plazo en diversas condiciones de almacenamiento.

Así mismo, se podría estudiar la adherencia de las nanopartículas de Ag/ZnO en los textiles depende de varios factores, como el método de deposición, la carga superficial de las partículas y la interacción con las fibras del textil. En general, si las nanopartículas se depositan mediante procesos físicos como la inmersión y secado, pueden perderse con lavados repetidos. No obstante, técnicas como la funcionalización química de la superficie del textil o el uso de agentes de anclaje pueden mejorar significativamente la resistencia al lavado, permitiendo que las propiedades fotocatalíticas y antimicrobianas se mantengan por más tiempo. Por ello, un siguiente paso a realizar serían pruebas de estabilidad frente a diferentes ciclos de lavado para evaluar la durabilidad del recubrimiento.

Finalmente, el escalamiento del proceso de síntesis y formulación permitiría analizar su viabilidad comercial y su impacto en el mercado de productos de limpieza avanzada.

4. REFERENCIAS

- [1] Cortazar, A; Coronel, C; Escalante, A & Gonzalez, C. (s.f). *Contaminación generada por colorantes de la industria textil*. Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
- [2] Rubiano, C., Marcela, C., Laguna, Alejandro, W., Zapata, Elena, C., & Miguel, J. (2004). *Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatálisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso*. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169421171002.pdf>
- [3] López, A. (2021). *Síntesis de nanopartículas de ZnO para la degradación de contaminantes en agua por medio de fotocatálisis*. Recuperado de <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/bitstreams/13f3c261-1b9e-4c83-8568-fad590ac167a/download>
- [4] FDA. (2024). *¿Qué tan seguros son los colorantes?* U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/consumers/articulos-para-el-consumidor-en-espanol/que-tan-seguros-son-los-colorantes>
- [5] Soto, G. (2021). *Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Magnéticas de Estructuras tipo Espinela por Plasma de Microondas para Degradación de Colorante tipo AZO*. Recuperado de <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/a9780668-5192-469d-9113-edf0db86968c/content>
- [6] Li, H.-C., Zhang, M., Qiyan Lv, Sun, K., Chen, X.-L., Qu, L., & Yu, B. (2024). Homogeneous catalysis and heterogeneous separation: Ionic liquids as recyclable photocatalysts for hydroacylation of olefins. *Chinese Chemical Letters*, 110579–110579. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.110579>
- [7] Abisha, P., C.G., J., & Sonia, S. (2024). Hierarchical synthesis of binary ZnO@MWCNTs heterogeneous photocatalyst derived from porous Zn metal organic framework (MOF) template: Study on the effective photodegradation of Congo red (CR) dye. *Current Applied Physics*, 60, 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2024.02.003>
- [8] Lenka, S., & Badamali, S. K. (2023). Nanostructured ZnO as an efficient heterogeneous photocatalyst towards degradation of lignin under visible light irradiation. *Molecular Catalysis*, 536, 112918. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.112918>
- [9] Domínguez-Talamantes, D. G., Vargas-Hernández, D., Hernández-Oloño, J. T., Rodríguez-Castellón, E., Arellano-Cortaza, M., Castillo, S. J., & Tánori-Córdova, J. C. (2024). Enhanced photocatalytic activity of FeSO₄ in a ZnO photocatalyst with H₂O₂ for dye degradation. *Optik*, 304, 171753. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171753>
- [10] Balu, S., Sethupathi Velmurugan, Selvakumar Palanisamy, Chen, S.-W., Vijayalakshmi Velusamy, Yang, T. C. K., & El-Shafey, E.-S. I. (2019). Synthesis of α -Fe₂O₃ decorated g-C₃N₄/ZnO ternary Z-scheme photocatalyst for degradation of tartrazine dye in aqueous media. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 99, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.03.011>
- [11] M D Furqaan Valiyathur, Sakvai, M. S., Sivaraj Mithra, Majed, S. A., Anver Basha Kottur, Azeez, & Raza, A. A. (2025). Photocatalytic and toxicity assessment of alginate reinforced ZnO-g-C₃N₄ photocatalyst for the degradation of methylene blue – A sustainable strategy. *International Journal of*

- Biological Macromolecules*, 298, 139935–139935.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139935>
- [12] Rasheed, H. M., Komal Aroosh, Meng, D., Ruan, X., Akhter, M., & Cui, X. (2024). A Review on Modified ZnO to Address Environmental Challenges through Photocatalysis: Photodegradation of Organic Pollutants. *Materials Today Energy*, 101774–101774.
<https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101774>
- [13] IBEC. (2017). *Nanopartículas de plata, el terror de las bacterias – My CMS*. Ibecbarcelona.eu.
<https://divulga.ibecbarcelona.eu/nanoparticulas-de-plata-el-terror-de-las-bacterias/>
- [14] Kadam, A. N., D.P. Bhopate, V.V. Kondalkar, S.M. Majhi, C.D. Bathula, Tran, A.-V., & Lee, S.-W. (2017). Facile synthesis of Ag-ZnO core–shell nanostructures with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 61, 78–86.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.12.003>
- [15] Martinez, F. M., G, E. Z., & Karen, A. (2015). Método de síntesis de nanopartículas de plata adaptable a laboratorios de docencia relacionado con la nanotecnología. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria En Nanociencia Y Nanotecnología*, 6(10).
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.10.50967>