DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 13, No. Especial 2 (2025) 48-53

Síntesis verde de nanopartículas $ZnFe_2O_4$ fotocatalíticas aplicadas en películas de poliestireno reciclado

Green synthesis of photocatalytic $ZnFe_2O_4$ nanoparticles applied in recycled polystyrene films

C. A. de León-Condes [a*], I. L. Cruz-Jaramillo [b], S. Ventura-Cruz [c], H. Niccolas-Morales [a], V. M. Ferreyra-Coroy [b], M. G. González-Pedroza [d]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Tecnológico Nacional de México/ TES de Tianguistenco, División de Ingeniería Industrial, Tianguistenco, Estado de México, México.*
[c] *Tecnológico Nacional de México/ TES de Tianguistenco, División de Ingeniería Ambiental, Tianguistenco, Estado de México, México.*
[d] *Departamento de Biotecnología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca 50200, Estado de México, México.*

Resumen

Se sintetizaron nanopartículas de $ZnFe_2O_4$ utilizando una infusión de planta mediante un método sencillo, de bajo consumo energético y con un tiempo de obtención optimizado en comparación con lo reportado en la literatura. La biosíntesis se confirmó mediante espectroscopía UV-Vis. Las nanopartículas se incorporaron en poliestireno reciclado, obteniendo tres bloques expuestos a la luz solar durante 30 días. El objetivo fue acelerar la degradación de este material para reducir su permanencia en el entorno, contribuyendo a la gestión de residuos de embalaje. La degradación se evaluó a través de la pérdida de peso, asociada a la escisión de enlaces en la cadena del poliestireno. Los datos fueron analizados mediante regresión lineal con un ($R^2 > 0.98$) confirmando cinética de degradación lineal. El análisis de ANOVA mostró diferencias significativas entre los bloques con y sin nanopartículas, confirmando su efecto diferenciado. El bloque con nanopartículas de hierro-zinc (B) perdió 4.62% de peso, duplicando la degradación con respecto al grupo control A. Las nanopartículas mostraron actividad efectiva antibacteriana contra *E. coli*. Estos hallazgos destacan la fotocatálisis sostenible aplicada en residuos plásticos, contribuyendo a los objetivos de desarrollo sustentable.

Palabras Clave: Poliestireno expandido reciclado, síntesis verde, fotocatalizador, nanopartículas metálicas, propiedades antibacterianas.

Abstract

$ZnFe_2O_4$ nanoparticles were synthesized using a plant infusion through a simple, low-energy method, with an optimized synthesis time compared to previously reported approaches. The biosynthesis was confirmed by UV-Vis spectroscopy. The nanoparticles were incorporated into recycled polystyrene, producing three blocks exposed to sunlight for 30 days. The aim was to accelerate the degradation of this material to reduce its persistence in the environment, contributing to packaging waste management. Degradation was evaluated by weight loss, associated with the scission of bonds in the polystyrene chain. The data were analyzed using linear regression ($R^2 > 0.98$), confirming a linear degradation kinetics. ANOVA analysis revealed significant differences between the blocks with and without nanoparticles, confirming their catalytic effect. The block containing Zn-Fe nanoparticles (Block B) exhibited a 4.62% weight loss, doubling the degradation observed in the control group (Block A). Additionally, the nanoparticles demonstrated effective antibacterial activity against *E. coli*. These findings highlight the potential of sustainable photocatalysis applied to plastic waste, contributing to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Recycled expanded polystyrene, green synthesis, photocatalyst, metal nanoparticles, antibacterial properties.

1. Introducción

El consumo anual de poliestireno expandido (EPS) en México asciende a aproximadamente 125,000 toneladas

*Autor para la correspondencia: cristina_deleon@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: cristina_deleon@uaeh.edu.mx (C.A. de León-Condes), victor_fc@test.edu.mx (V. M. Ferreyra-Coroy), ivan_cj@test.edu.mx (I. L. Cruz-Jaramillo), sagnite_ambiental@test.edu.mx (S. Ventura-Cruz), hnicolas@uaeh.edu.mx (H. Niccolas-Morales).

Historial del manuscrito: recibido el 14/03/2025, última versión-revisada recibida el 15/07/2025, aceptado el 15/07/2025, en línea (postprint) desde el DD/MM/AAAA, publicado el 15/09/2025. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial2.14686

(Gonzalez-Aguilar et al., 2022). Tan solo en 2020, se estimó que en la Ciudad de México se generaban diariamente alrededor de 190.74 toneladas de este material, con una tasa de reciclaje inferior al 0.10 (Pérez-Bravo et al., 2022). El poliestireno es un termoplástico ampliamente utilizado, especialmente en embalajes y productos de aislamiento, la mayoría de ellos de un solo uso. Su carácter no biodegradable representa un serio problema ambiental, ya que puede permanecer en el entorno durante cientos de años (Hidalgo-Crespo 2022). Esta persistencia lo convierte en una amenaza para los ecosistemas, al grado de incorporarse a la cadena alimentaria humana (Kouchakipour et al., 2024).

Por otro lado, las nanopartículas —materiales con tamaños entre 1 y 100 nanómetros— poseen una elevada relación superficie-volumen en comparación con sus contrapartes a escala convencional, lo cual les confiere propiedades singulares. Estas partículas pueden obtenerse por métodos físicos, químicos o mediante rutas biológicas (también conocidas como métodos verdes), a partir de extractos vegetales (hojas, raíces, frutos ricos en polifenoles) o bien a través del uso de hongos, algas y bacterias. Dependiendo de su composición, las nanopartículas pueden presentar propiedades ópticas, antisépticas, mecánicas y químicas, entre otras (Bordiwala, 2023).

Actualmente, existen diversos métodos para la eliminación de contaminantes orgánicos —incluidos procesos físicos, químicos, biológicos y electroquímicos— muchos de los cuales se basan en procesos de oxidación avanzada. Entre estos, destacan los que emplean nanomateriales fotocatalíticos, dada su eficiencia, bajo costo y la menor generación de subproductos tóxicos. Esta tecnología ha sido especialmente aplicada en el tratamiento de aguas residuales (Priya et al., 2023). Este estudio propone una alternativa alineada con la producción y el consumo responsable, mediante la incorporación de nanopartículas metálicas de hierro y zinc, sintetizadas por vía verde, en películas de poliestireno expandido. Estas nanopartículas fotocatalíticas buscan acelerar su degradación, reduciendo su persistencia ambiental y contribuyendo a la valorización de residuos plásticos como al desarrollo de materiales compuestos sostenibles.

2. Proceso experimental.

2.1 Materiales

Para el proceso verde de obtención de nanopartículas fue utilizado infusión de mejorana *(Origanum majorana)*. Obtenida del mercado local de Santiago Tianguistenco. Para las soluciones precursoras de las nanoparticulas se utilizó Cloruro de hierro (II) tetrahidrato ($Cl_2Fe{\cdot}4H_2O$) y Hexahidrato de nitrato de zinc $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) y Tolueno Sigma-Aldrich. Como disolvente del poliestireno se utilizó Tolueno marca Wohler W8883-01. Cajas Petri para extender las películas y Molino pulverizador granos, semillas especias eléctrico para moler residuos de poliestireno de embalajes.

2.2 Metodología

La metodología consistió en revisar el estado del arte de trabajos relacionados con el tema. Establecer propuesta fundamentada en autores y evaluar resultados como muestra de forma general en la Figura 1.

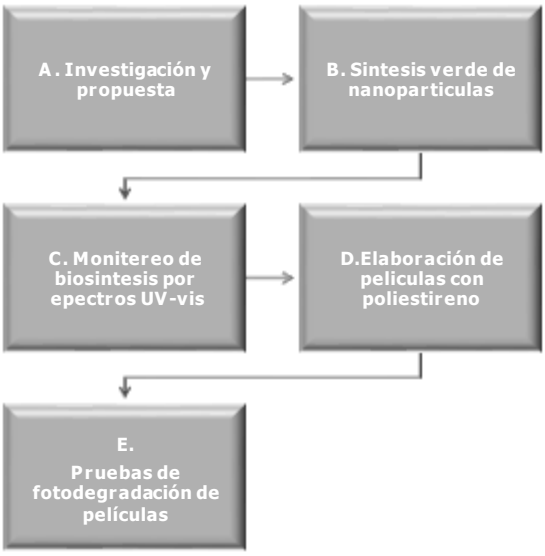

Figura 1. Metodología del estudio.

2.2.1 Síntesis verde de nanopartículas

La infusión se obtuvo añadiendo 20 gramos de mejorana molida y seca *(Origanum majorana)* a 250 mL de agua destilada a 80 °C en un vaso de precipitado de 500 mL, manteniéndose en contacto durante 5 minutos. Transcurrido este tiempo, la mezcla se dejó reposar durante 10 minutos fuera de la fuente de calor y luego se filtró. A temperatura ambiente (20 °C), se tomaron 50 mL de la infusión para cada una de las siguientes preparaciones:

Nanopartículas de hierro: En un vaso de precipitado, se mezclaron 50 mL de la infusión con una solución de hierro previamente preparada (2.98 g disueltos en 50 mL de agua destilada), bajo agitación constante durante 30 minutos. La mezcla resultante se filtró y se dejó secar a temperatura ambiente.

Nanopartículas de zinc: En un crisol, se añadieron 50 mL de la infusión a una solución de zinc (6.9 g disueltos en 50 mL de agua destilada). La mezcla se calcinó a 400 °C durante 30 minutos con agitación constante. Finalmente, las nanopartículas obtenidas se recolectaron en un vial.

2.2.2 UV-vis

La formación de nanopartículas metálicas fue monitoreada mediante espectroscopía UV–vis, utilizando un espectrofotómetro Perkin-Elmer Modelo Lambda 25. Las mediciones se realizaron en un rango de longitud de onda de 250 a 800 nm, lo que permitió observar los cambios espectrales característicos asociados con la bioreducción de partículas de hierro en solución.

2.2.3 Elaboración de películas

Se acondicionó poliestireno expandido de desecho proveniente de embalajes, fragmentándolo en un molino de granos hasta obtener un tamaño de partícula promedio de 0.5 cm. Para la preparación de las películas, se mezclaron 5 gramos de poliestireno con 20 mL de tolueno extendido en cajas petri.

Se elaboraron tres bloques: un bloque de control (A), compuesto únicamente por poliestireno; un segundo bloque (B), al que se le adicionaron 10 mg de nanopartículas (5 mg de hierro y 5 mg de zinc); y un tercer bloque (C), al que se le adicionaron 20 mg de nanopartículas (10 mg de hierro y 10 mg de zinc). Después de agregar las nanopartículas por agitación fueron sometidas a sonicación durante 20 minutos. Las películas se dejaron secar a temperatura ambiente durante quince días.

Las muestras fueron obtenidas y utilizadas experimentalmente por triplicado.

2.2.4 Pruebas de fotodegradación de las películas

Se establecieron tres bloques expuestos a la luz solar durante 30 días en horario de 10-15 horas donde el sol es más intenso entre noviembre y diciembre 2023 en Tianguistenco, Estado de México, monitoreando su peso cada 7 días para registro de comportamiento de pesos y fotografías. La pérdida de peso fue el indicador de medida, debido a que la degradación de polímeros implica cambios en sus propiedades, como resistencia a la tracción, color, forma o peso, bajo la influencia de factores ambientales como calor, luz, oxígeno y sustancias químicas.

La degradación del poliestireno ocurre por escisión aleatoria de enlaces en la cadena del polímero, lo que reduce su peso molecular. Estos cambios pueden ser indeseables o deseables, según el objetivo, como la degradación (Speight, 2020).

3. Resultados

3.1 Producción verde de nanopartículas

En la biosíntesis de nanopartículas, el espectro UV-Vis permite observar indicios en las bandas obtenidas durante el análisis de las soluciones (infusiones, soluciones metálicas y mezclas de ambas). Los polifenoles contenidos en la infusión se oxidan mientras los iones metálicos se reducen, esto ocurre cuando la infusión se agrega a la solución metálica de hierro y zinc. Este proceso da lugar a la formación de partículas de tamaño nanométrico en la solución resultante, y es comprobable al observar el fenómeno llamado resonancia plasmónica superficial, que surge de la excitación de electrones en la superficie de las nanopartículas e induce propiedades ópticas. Esta característica le genera a las nanopartículas una amplia variedad de aplicaciones en diferentes campos. Los espectros de absorción UV-Visible de las nanopartículas obtenidas en este trabajo de investigación se muestran en la Figura 2. Las líneas punteadas de color gris, azul y verde corresponden al espectro de las soluciones de hierro, zinc y extracto de mejorana, respectivamente. La reacción ocurre al combinar las soluciones de hierro y zinc con el extracto de mejorana, obteniendo nuevos espectros representados por las líneas continuas gris y azul, donde se distingue claramente la diferencia entre los espectros.

Un pico de absorción alrededor de los 300 nm en el espectro UV-Vis es característico de las nanopartículas de ZnO, al igual que el observado a 359 nm. Ambos picos se atribuyen principalmente a la excitación de electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, un comportamiento típico de las nanopartículas de zinc (Aldalbahi et al., 2020; Gangwar et al., 2023). Por otro lado, el pico en torno a los 323 nm en el espectro UV-Vis es una característica común de las nanopartículas de hierro (Fe NPs), y esta banda de absorción suele asociarse a la resonancia plasmónica superficial de las nanopartículas (Saif et al., 2019).

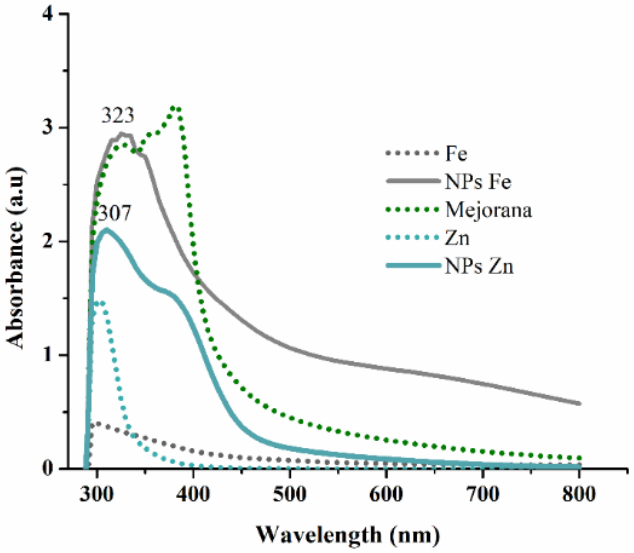

Figure 2. Espectros UV-vis de solución de hierro •••, solución de zinc ••• extracto de mejorana ••• y NPs zinc— y NPs hierro —.

3.2 Mejora del proceso

A diferencia de los métodos físicos o químicos, que requieren sustancias tóxicas, equipos costosos y un alto consumo de energía, los extractos de plantas pueden reducir los iones de hierro en cuestión de minutos u horas, variando su velocidad según la planta y la concentración del extracto (Khairul Hanif Mohd Nazri & Sapawe, 2020). En la síntesis verde de nanopartículas de zinc, a menudo es necesario someterlas a un proceso de calcinación o recocido para eliminar impurezas, activar el dopante y optimizar sus propiedades eléctricas, ópticas, fotocatalíticas y antibacterianas (Karam & Abdulrahman, 2022). La temperatura y el tiempo de la calcinación son parámetros optimizables. La Tabla 1 muestra los resultados de este estudio comparados con trabajos similares. Aunque Sharma y colaboradores reportan valores idénticos de temperatura y tiempo, su método de síntesis química implica mayores costos y el uso de equipos y sustancias adicionales, a diferencia del método biológico, que solo requiere el extracto de la planta.

Tabla 1. Comparativa de temperaturas con otros trabajos de investigación.

NPs	Método	Temperatura de calcinación (°C)	Tiempo (minutos)	Autor
ZnO	Sol Gel (químico)	300-400	no menciona	(Ismail et al., 2019)
ZnO	Precipitación (químico)	400	30 min	(Sharma et al., 2023)
ZnO	Extractos de hojas (biológico)	500	120 min	(Supin et al., 2023)
ZnO	Extractos de hojas (biológico)	400	30 min	Este trabajo

3.3 Degradación de películas

En la Figura 3, el eje X representa los bloques de muestra: A (poliestireno sin nanopartículas), B (poliestireno con 10 mg de nanopartículas) y C (poliestireno con 20 mg de nanopartículas). El eje Y indica los días de exposición, durante los cuales se tomaron fotografías y se midió el peso para evaluar los cambios. Las líneas punteadas amarillas resaltan las muestras con nanopartículas al final de la exposición, evidenciando un deterioro notable en comparación con el bloque A. Visualmente, el bloque B mostró el mayor deterioro, con imperfecciones en forma de burbujas más pronunciadas que en el bloque C que también las tienen. Esto es consistente con los resultados de pesos monitoreados cada siete días.

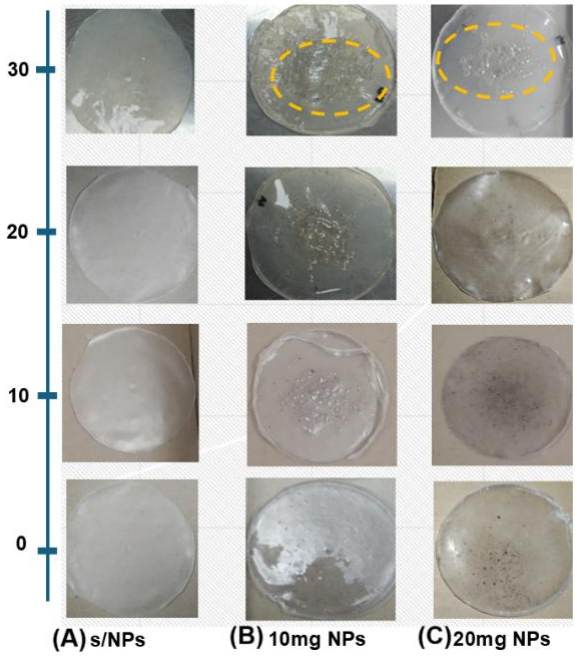

Figura 2. Fotografías de películas tomadas cada 7 días de exposición al sol.

3.4 Regresión lineal

Los datos obtenidos del monitoreo del peso (en gramos) fueron analizados mediante regresión lineal para evaluar la relación entre dos variables cuantitativas: días y peso. En la Figura 4 se observa los tres bloques analizados, el coeficiente de correlación fue superior a 0.98, lo que indica una relación muy fuerte y positiva entre ambas variables. Esto significa que, a medida que una variable aumenta, la otra varía de manera casi proporcional en este caso en sentido opuesto. Estos resultados sugieren una dependencia lineal entre las variables. De acuerdo con los datos, se observa que los bloques que contenían nanopartículas (B y C) experimentaron una reducción del 4.62% y 4.0% de su peso inicial, respectivamente, mientras que el bloque A (sin nanopartículas) presentó una reducción del 2.4%. Esto coincide con las fotografías de las películas, donde, visualmente, el bloque 2 presenta más cavidades que el resto de los bloques. Las nanopartículas adicionadas a 10 mg contribuyen a que la degradación ocurra el doble de rápido que en ausencia de estas. Las películas que contenían 20 mg de nanopartículas pudieron haberse apelmazado, lo que posiblemente inhibió su reacción.

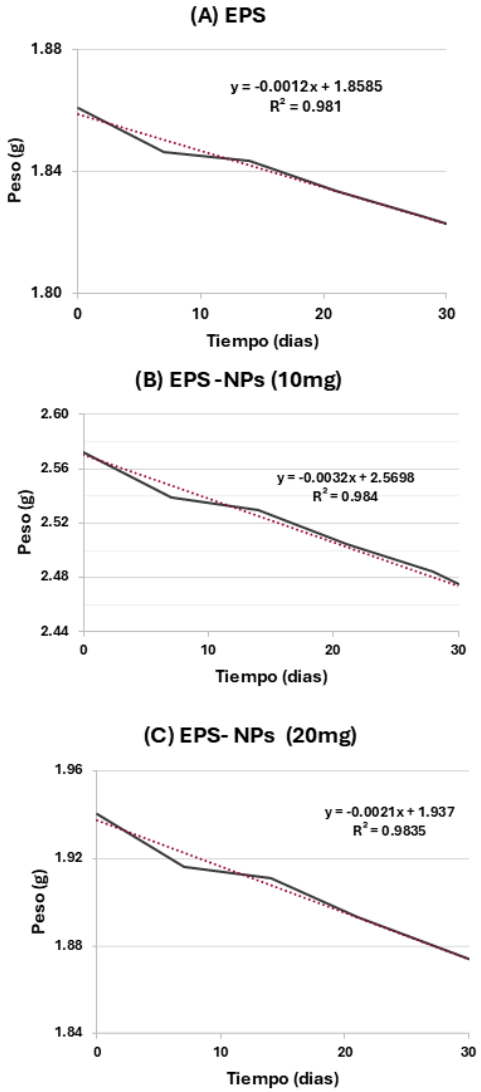

Figura 4. Regresión lineal de datos de pesos de películas expuestas al sol.

3.5 Análisis de Varianza (ANOVA)

Los datos de monitoreo de pesos de los bloques (A, B y C) se analizaron en el software Statgraphics 19 mediante el Análisis de Varianza (ANOVA), con el objetivo de comparar las medias de los grupos y verificar la homogeneidad de las varianzas. Se evaluó si la dispersión de los datos alrededor de la media era similar en todos los bloques.

Statgraphics 19 en la Tabla 2 muestra el ANOVA obtenido para el análisis de datos, la variación en los pesos de los bloques revela una razón-F de 857.52, esto representa la relación entre la variabilidad entre y dentro de los grupos. Dado que el valor-P asociado a la prueba F es menor que 0.05, se concluye que, si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los pesos entre los bloques, con un nivel de significancia del 5%.

Tabla 2. Análisis de ANOVA para pesos por bloques.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.67121	2	0.835606	857.52	0.0000
Intra grupos	0.0146167	15	0.000974444		
Total (Corr.)	1.68583	17			

En la Tabla 3, las pruebas de rangos múltiples para los pesos entre los bloques muestran diferencias estadísticamente significativas entre los pares de medias señalados con asterisco, con un nivel de confianza del 95.0%. En la columna de Grupos Homogéneos no existe alineación de las 'X' lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias, utilizando el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, con un riesgo del 5.0% de error al declarar que cada par de medias es significativamente diferente.

Tabla 3. Análisis de pruebas de rangos múltiples para los pesos entre los bloques.

Método: 95.0 porcentaje LSD

BLOQUES	Casos	Media	Grupos Homogéneos
A	6	1.83833	X
C	6	1.9	X
B	6	2.51333	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
A - B	*	-0.675	0.0384144
A - C	*	-0.0616667	0.0384144
B - C	*	0.613333	0.0384144

* indica una diferencia significativa.

La Tabla 4 muestra como la verificación de varianza evalúa la hipótesis de que las desviaciones estándar de los pesos entre bloques son iguales. El valor-P general (0.0970) es mayor o a 0.05, lo cuál indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las desviaciones estándar, con un nivel de confianza del 95.0%. Sin embargo al comparar por pares de bloques en la comlumna de Comparación, se observa que el valor-P entre los bloques A y B (poliestireno sin nanopartículas y poliestireno con 10 mg de nanopartículas) es menor a 0.05 (0.0338), esto indica que si existe diferencia significativa en su variabilidad con un nivel de significancia del 5%.

Tabla 4. Verificación de Varianza

	Prueba	Valor-P
Levene's	2.73707	0.0970

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
A / B	0.0147196	0.0432049	0.116071	0.0338
A / C	0.0147196	0.0289828	0.257937	0.1633
B / C	0.0432049	0.0289828	2.22222	0.4014

3.6 Mecanismo de fotodegradación

Cuando la luz solar incide sobre las nanopartículas de hierro y zinc, estas absorben fotones con la energía suficiente para excitar electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción de los metales. Esta excitación da lugar a la formación de pares electrón-hueco en la superficie de las nanopartículas, iniciando así el proceso fotocatalítico. Como resultado, se generan especies reactivas con oxígeno y agua presentes en el ambiente, tales como los radicales hidroxilo (•OH) y aniones superóxido ($\bullet O_2^-$), los cuales atacan y degradan la estructura del polímero, provocando la escisión y oxidación de las cadenas, y culminando en su fragmentación o incluso la mineralización (Nikhar et al., 2024). La combinación con hierro fue debido a que el óxido de zinc con otros semiconductores o materiales conductores mejora la eficiencia fotocatalítica al ampliar la absorción de luz y generar sitios de captura para los electrones y huecos fotogenerados. Esto reduce su recombinación y favorece una mayor separación de cargas, optimizando así el rendimiento del proceso fotocatalítico (Mao et al., 2022).

3.7 Actividad antibacteriana de la película

En el antibiograma de la Figura 5 se presentan cuatro cuadrantes, cada uno con un disco que contiene diferentes nanopartículas: (I) nanopartículas de zinc (Zn), (II) nanopartículas de hierro (Fe), (III) una combinación de nanopartículas de hierro y zinc (Fe+Zn) y (IV) nanopartículas de plata (Ag NPs). Se observa una clara zona de inhibición en el área transparente alrededor del disco de nanopartículas de plata, lo que indica que estas inhibieron eficazmente el crecimiento de *E. coli*. Estas nanopartículas se utilizaron como referencia estándar para comparar el efecto del resto. Se identifican zonas de inhibición alrededor de los discos con nanopartículas de hierro y de la combinación hierro-zinc, aunque de menor tamaño. En el caso del zinc, se registró el menor halo de inhibición. Estos resultados son consistentes con la literatura, que destaca las potentes propiedades antibacterianas de la plata. Cabe destacar que la combinación de nanopartículas de hierro y zinc (Fe+Zn) exhibe una actividad antibacteriana superior a la de las nanopartículas de hierro y zinc por separado. Esto sugiere un posible efecto sinérgico, en el que la combinación de ambos metales potencia la eficacia antibacteriana. La confirmación de la actividad antibacteriana de las nanopartículas de hierro-zinc es fundamental para esta investigación, ya que es necesario que las películas presenten un efecto antibacteriano capaz de inhibir eficazmente el crecimiento celular. Esto, a su vez, permite el paso de la luz solar cuando las películas están expuestas contribuyendo a su degradación.

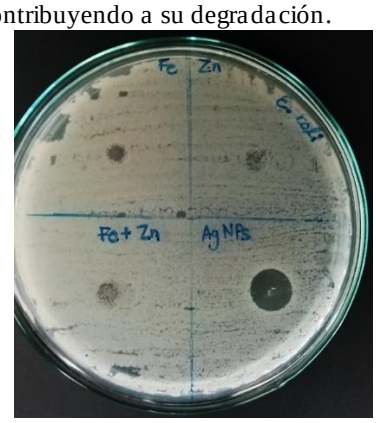

Figura 4. Zona de inhibición contra *E. coli* en placas de agar nutritivo utilizando nanopartículas antibacterianas.

3.7 Mecanismo de fotodegradación

La incorporación de nanopartículas de hierro a las de zinc modifica la estructura electrónica del óxido de zinc, reduciendo la energía de su banda prohibida. Al integrarse ambas en las películas de poliestireno, el mecanismo sugerido podría funcionar de la siguiente manera: facilita la excitación de electrones cuando el material se expone a la luz solar, generando pares electrón-hueco (e^- -h^+). Los huecos (h^+) reaccionan con el agua y oxigeno adsorbida en la superficie del catalizador en este caso presente en el ambiente, produciendo radicales hidroxilos (•OH), mientras que los electrones (e^-) reducen el oxígeno adsorbido, generando radicales superóxidos ($O2\bullet^-$). Estas especies altamente reactivas oxidan el plástico que soporta las nanopartículas catalizadoras, descomponiéndolo en productos de menor peso molecular,

incluyendo compuestos carbonílicos, CO_2 y H_2O (Lam et al., 2020).

Conclusiones

Las nanopartículas de hierro y zinc fueron sintetizadas por proceso verde utilizando extractos de mejorana *(origanum majorana)*. Posteriormente, se combinaron e incorporaron en películas de poliestireno expandido reciclado en dos concentraciones distintas: 10 mg y 20 mg.

Los bloques se expusieron a la luz solar durante 30 días, monitoreando la pérdida de peso como un indicador de la degradación del polímero, atribuida a la escisión de cadenas poliméricas inducida por el mecanismo electrón-hueco.

El bloque con 10 mg de nanopartículas (bloque B) presentó la mayor pérdida de peso, con una reducción del 4.62% respecto a su peso inicial, demostrando el doble de rapidez en comparación con el bloque A (sin nanopartículas). Se sugiere que la mayor concentración de nanopartículas en el bloque C (20 mg) pudo haber limitado las reacciones de degradación, posiblemente debido a la aglomeración de las nanopartículas, lo que habría reducido su eficiencia en la superficie de la película de poliestireno expandido reciclado.

Agradecimientos

De León-Condes agradece el apoyo del Laboratorio de Ciencias Ambientales del CCIQS UAEM-UNAM, y al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo a través del programa FICDTEM-2022-01, proyecto FICDTEM-2023-107.

Referencias

Aldalbahi, A., Alterary, S., Ali Abdullrahman Almoghim, R., Awad, M. A., Aldosari, N. S., Fahad Alghannam, S., Nasser Alabdan, A., Alharbi, S., Ali Mohammed Alateeq, B., Abdulrahman Al Mohsen, A., Alkathiri, M. A., & Abdulrahman Alrashed, R. (2020). Greener Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles: Characterization and Multifaceted Applications. *Molecules*, *25*(18), 1–14. https://doi.org/10.3390/molecules25184198

Bordiwala, R. V. (2023). Green synthesis and Applications of Metal Nanoparticles.- A Review Article. *Results in Chemistry*, *5*(January), 3–6. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100832

Gangwar, J., Singh, A. P., Marimuthu, N., & Sebastian, J. K. (2023). Environmentally sustainable zinc oxide nanoparticles for improved hazardous textile dye removal from water bodies. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, *72*(7), 1198–1210. https://doi.org/10.2166/aqua.2023.023

Gonzalez-Aguilar, A. M., Cabrera-Madera, V. P., Vera-Rozo, J. R., & Riesco-Ávila, J. M. (2022). Effects of Heating Rate and Temperature on the Thermal Pyrolysis of Expanded Polystyrene Post-Industrial Waste. *Polymers*, *14*(22). https://doi.org/10.3390/polym14224957

Ismail, A. M., Menazea, A. A., Kabary, H. A., El-Sherbiny, A. E., & Samy, A. (2019). The influence of calcination temperature on structural and antimicrobial characteristics of zinc oxide nanoparticles synthesized by Sol–Gel method. *Journal of Molecular Structure*, *1196*, 332–337. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.06.084

Karam, S. T., & Abdulrahman, A. F. (2022). Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles by Using Thyme Plant Leaf Extract. *Photonics*, *9*(8). https://doi.org/10.3390/photonics9080594

Khairul Hanif Mohd Nazri, M., & Sapawe, N. (2020). A short review on green synthesis of iron metal nanoparticles via plants extracts. *Materials Today: Proceedings*, *31*, A48–A53. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.968

Kouchakipour, S., Hosseinzadeh, M., Qaretapeh, M. Z., & Dashtian, K. (2024). Sustainable large-scale Fe3O4/carbon for enhanced polystyrene nanoplastics removal through magnetic adsorption coagulation. *Journal of Water Process Engineering*, *58*(January), 104919. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104919

Lam, S., Sin, J., Zeng, H., Lin, H., Xiang, H., Chai, Y., Choong, K., & Rahman, A. (2020). *Síntesis verde de nanopartículas de Fe-ZnO con rendimiento fotocatalítico de luz solar mejorado para el deterioro de la película de polietileno y la inactivación bacteriana*. *xxxx*, 10–13.

Mao, T., Liu, M., Lin, L., Cheng, Y., & Fang, C. (2022). A Study on Doping and Compound of Zinc Oxide Photocatalysts. *Polymers*, *14*, 4484. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ polym14214484

Nikhar, S., Kumar, P., & Chakraborty, M. (2024). A review on microplastics degradation with MOF: Mechanism and action. *Next Nanotechnology*, *5*(February), 100060. https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2024.100060

Pérez-Bravo, G., Contreras-Larios, J. L., Rodríguez, J. F., Zeifert-Soares, B., Angeles-Beltrán, D., López-Medina, R., Vázquez-Rodríguez, T., & Salmones-Blasquez, J. (2022). Catalytic Pyrolysis Process to Produce Styrene from Waste Expanded Polystyrene Using a Semi-Batch Rotary Reactor. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(22). https://doi.org/10.3390/su142214914

Priya, S. C., Vijayalakshmi, S., Raghavendra, S. G., Yıldızhan, S., & Ranjitha, J. (2023). A critical review on efficient photocatalytic degradation of organic compounds using copper-based nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, *80*(xxxx), 3075–3081. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.169

Saif, S., Tahir, A., Asim, T., Chen, Y., & Adil, S. F. (2019). Polymeric nanocomposites of iron–oxide nanoparticles (Ionps) synthesized using terminalia chebula leaf extract for enhanced adsorption of arsenic(v) from water. *Colloids and Interfaces*, *3*(1). https://doi.org/10.3390/colloids3010017

Sharma, V., Sharma, J. K., Kansay, V., Sharma, V. D., Sharma, A., Kumar, S., Sharma, A. K., & Bera, M. K. (2023). The effect of calcination temperatures on the structural and optical properties of zinc oxide nanoparticles and their influence on the photocatalytic degradation of leather dye. *Chemical Physics Impact*, *6*(March). https://doi.org/10.1016/j.chphi.2023.100196

Speight, J. G. (2020). Monomers, polymers, and plastics. In *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809923-0.00014-x

Supin, K. K., Parvathy Namboothiri, P. N., & Vasundhara, M. (2023). Enhanced photocatalytic activity in ZnO nanoparticles developed using novel Lepidagathis ananthapuramensis leaf extract. *RSC Advances*, *13*(3), 1497–1515. https://doi.org/10.1039/d2ra06967a