Ingeniería y Competitividad
Vol 28 (3) 2026 doi: 10.25100/iyc.v28i3.15651

Vol 28 (3)

ISSN
0123-3033
e- 2027-8284

Artículo de revisión

Procesos de ozonización para la eliminación de acetaminofén en aguas residuales: revisión sistemática y bibliométrica

Ozonation Processes for the Removal of Acetaminophen from Wastewater: A Systematic and Bibliometric Review

Joseph Soto-Verjel[1] Laura Alvear-Ovallos[1] Edward Celi-Avellaneda[1] Luisa Ramírez-Ríos[2] Dorance Becerra-Moreno[1]

[1]Departamento de Ciencias del Medio Ambiente, Grupo de Investigación en Procesos Ambientales GIPROAM Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.
[2]Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de Los Llanos, Villavicencio - Meta, Colombia.

Resumen

Introducción: El acetaminofén es un contaminante emergente de creciente preocupación por su presencia y persistencia en cuerpos de agua. Los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales presentan limitaciones para eliminar compuestos farmacéuticos y pueden alcanzar bajos niveles de mineralización, favoreciendo la formación de subproductos intermedios potencialmente tóxicos. En este contexto, la ozonización catalítica se perfila como una tecnología avanzada para mejorar su degradación y mineralización.
Objetivo: Analizar el comportamiento y la eficiencia de los procesos de ozonización y ozonización catalítica para la remoción de acetaminofén en aguas residuales.
Metodología: Se recopilaron 82 artículos científicos publicados entre 1988 y 2025, seleccionados mediante una búsqueda sistemática en Scopus. La información se procesó mediante VOSviewer para caracterizar las tendencias de investigación y estructurar una revisión técnica especializada.
Resultados: Los resultados bibliométricos evidenciaron un incremento sostenido del interés científico desde 2013, con un pico entre 2017 y 2022, asociado principalmente con ozonation, pharmaceuticals y wastewater treatment. La revisión técnica confirmó las limitaciones de los tratamientos biológicos convencionales frente a compuestos recalcitrantes como el acetaminofén. La ozonización catalítica, particularmente mediante catalizadores como la magnetita, mostró mayor capacidad de degradación y mineralización, alcanzando hasta 99,2%, frente a aproximadamente 51% de reducción de DQO reportada para la ozonización simple.
Conclusiones: La ozonización catalítica se posiciona como una alternativa prometedora para el tratamiento avanzado de aguas residuales con contaminantes farmacéuticos.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, Efluentes hospitalarios, Ozonización catalítica, Paracetamol, Procesos de oxidación avanzada y radicales hidroxilo.

Abstract

Introduction: Acetaminophen is an emerging contaminant of growing concern due to its presence and persistence in water bodies. Conventional wastewater treatment processes have limitations in removing pharmaceutical compounds and may achieve low levels of mineralization, favoring the formation of potentially toxic intermediate by-products. In this context, catalytic ozonation emerges as an advanced technology to improve their degradation and mineralization.
Objective: To analyze the behavior and efficiency of ozonation and catalytic ozonation processes for the removal of acetaminophen from wastewater.
Methodology: A total of 82 scientific articles published between 1988 and 2025 were collected through a systematic search in Scopus. The information was processed using VOSviewer to characterize research trends and structure a specialized technical review.
Results: The bibliometric results showed a sustained increase in scientific interest since 2013, with a peak between 2017 and 2022, mainly associated with ozonation, pharmaceuticals, and wastewater treatment. The technical review confirmed the limitations of conventional biological treatments for recalcitrant compounds such as acetaminophen. In contrast, catalytic ozonation, particularly using catalysts such as magnetite, showed greater degradation and mineralization capacity, reaching up to 99.2%, compared with approximately 51% COD reduction reported for simple ozonation.
Conclusions: Catalytic ozonation is positioned as a promising alternative for the advanced treatment of wastewater containing pharmaceutical contaminants.

Keywords: Emerging contaminants, Hospital effluents, Catalytic ozonation, Paracetamol, Advanced oxidation processes, and hydroxyl radicals.

¿Cómo citar?

Soto-Verjel J, Alvear-Ovallos L, Celi-Avellaneda E, Ramírez-Ríos L, Becerra-Moreno D. Procesos de ozonización para la eliminación de acetaminofén en aguas residuales: revisión sistemática y bibliométrica. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(3) e-30215651

https://doi.org/10.25100/iyc.v28i3.15651

Recibido: 16/02/26
Revisado: 27/05/26
Aceptado: 20/08/26
Online: 5/10/26

Correspondencia

josephwbeimarsv@ufps.edu.co

CrossMark

CC BY NC SA

OPEN ACCESS

¿Por qué se realizó el estudio?
Para evaluar sistemáticamente la aplicación de procesos de oxidación avanzada basados en ozonización para la eliminación de paracetamol en aguas residuales, abordando las limitaciones del tratamiento convencional e identificando lagunas en la investigación relacionadas con la mineralización, los productos de transformación, la toxicidad y la aplicación en condiciones reales.

¿Cuáles fueron los hallazgos clave?
La revisión demostró que la ozonización catalítica generalmente ofrece mayores eficiencias de degradación y mineralización que la ozonización convencional; algunos sistemas catalíticos alcanzan hasta un 99,2 % de mineralización. No obstante, el rendimiento depende en gran medida de las condiciones operativas y de la matriz del agua residual, mientras que la toxicidad de los productos de transformación y la aplicación a gran escala siguen sin evaluarse suficientemente.

¿Qué aportan estos hallazgos?
Los resultados ofrecen una visión general estructurada del desarrollo científico y el rendimiento técnico de las tecnologías basadas en ozonización para la eliminación de paracetamol, al tiempo que destacan prioridades para futuras investigaciones, tales como la validación con aguas residuales reales, la reutilización de catalizadores y la viabilidad económica, la evaluación ecotoxicológica y el análisis de ciclo de vida.

Graphical Abstract



doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

Introducción

La creciente preocupación global por la calidad del agua se ha intensificado debido a la presencia de contaminantes emergentes (CE). Las CE son sustancias, como productos farmacéuticos y de cuidado personal, que se encuentran en el medio ambiente y que pueden tener efectos adversos en los ecosistemas y la salud humana(1,2)**.** Los contaminantes emergentes han cobrado una importancia creciente en las últimas décadas debido a su frecuente detección en cuerpos de agua superficiales, aguas subterráneas y sistemas de suministro de agua potable. A pesar de los riesgos potenciales asociados a su presencia, muchos de estos compuestos aún no están regulados específicamente bajo diversas leyes medioambientales. Esta situación ha impulsado investigaciones orientadas a comprender su comportamiento ambiental, evaluar sus riesgos ecotoxicológicos y fortalecer las estrategias de gestión y control. Además, se reconoce la necesidad de implementar tecnologías de tratamiento más eficientes que minimicen los impactos ambientales, económicos y de salud pública asociados a la presencia de contaminantes emergentes en los recursos hídricos(3,4).

Paracetamol (ACT), también conocido como paracetamol (ACT), es un analgésico y reductor de fiebre ampliamente utilizado en todo el mundo (5), se ha detectado repetidamente en varias matrices acuáticas (6,7). Estos incluyen agua potable, aguas residuales, aguas superficiales, aguas subterráneas e incluso lixiviado de vertederos (8). Su presencia se debe a su uso generalizado, la excreción incompleta por humanos y animales, las vertidas de efluentes de la industria farmacéutica y la eliminación inadecuada de medicamentos caducados o no utilizados (9). A pesar de las variaciones en las concentraciones, solo alrededor del 80–92% de esta cantidad se degrada durante los procesos de tratamiento convencionales, lo que resulta en una descarga significativa de ACTs en cuerpos de agua naturales (8). La acumulación de ACT y sus metabolitos puede causar efectos ecotóxicos severos, incluyendo daños al código genético, degradación de lípidos oxidativos, desnaturalización de proteínas en células y toxicidad demostrada en bacterias, algas, macrófitos, protozoos y peces (10). Específicamente, concentraciones superiores a 1,8 µg/L de ACT pueden inducir respuestas tóxicas en la vida acuática (6).

Dado este escenario, los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, como los procesos biológicos (11) y filtración (5), han demostrado ser ineficaces para eliminar completamente el ACT y otros compuestos farmacéuticos recalcitrantes (12). La complejidad de la estructura molecular de estos fármacos y sus propiedades fisicoquímicas no facilitan su degradación por procesos biológicos tradicionales(13) . Además, los procesos de tratamiento primario alcanzan eficiencias de eliminación de solo un 20% a un 50% para varios compuestos farmacéuticos(11) , y la oxidación parcial de estos contaminantes puede conducir a la formación de subproductos más tóxicos, como se ha observado con el ozono, que puede formar N-nitrosodimetilamina (14). Aunque los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales (WWTPs) pueden alcanzar tasas aparentes de eliminación de hasta el 80–92% para paracetamol (15), las concentraciones residuales en los efluentes siguen siendo motivo de preocupación medioambiental, con valores de 21,357 ng/L en los efluentes hospitalarios de China, muy por encima de los registrados en estudios previos en Vietnam (10,734 ng/L) y Grecia (9,300 ng/L) (16). Esta comparación revela una tendencia hacia mayores concentraciones residuales reportadas en estudios más recientes en comparación con

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

investigaciones realizadas en años anteriores, lo que sugiere una mayor persistencia y presencia de este contaminante en los sistemas acuáticos**.** Estas concentraciones superan con creces el umbral de toxicidad acuática (1,8 mg/L) (17) y están asociadas a efectos crónicos en organismos como la trucha arcoíris, incluyendo daños en riñones, branquias e hígado (7)**.** Esta persistencia confirma la insuficiencia de los métodos de tratamiento convencionales y subraya la necesidad de desarrollar tecnologías más eficaces y sostenibles para prevenir los riesgos ecotoxicológicos derivados de la continua descarga de contaminantes emergentes (11).

Dentro del campo de las Tecnologías Avanzadas de Oxidación**,** la técnica de ozonización y sus variantes catalíticas han surgido como soluciones prometedoras para la eliminación de contaminantes emergentes(18) . El ozono (O3) es un potente agente oxidante con un alto potencial de reducción estándar (E° = 2,07 V/SHE) (9), capaz de reaccionar directamente con compuestos orgánicos o descomponerse en agua para generar especies oxidantes aún más reactivas, como los radicales hidroxilo (•OH, E° = 2,8 V/SHE)(9) . A diferencia de otros reactivos, se puede generar ozono In situ, eliminando la necesidad de transportar y almacenar materiales peligrosos, y no produce subproductos clorados en aguas residuales reales (7). Sin embargo, la ozonización convencional se enfrenta a limitaciones como la mineralización incompleta y la posible formación de subproductos más tóxicos que el compuesto original, como intermedios aromáticos primarios, derivados aromáticos secundarios, ácidos carboxílicos alifáticos y ácidos persistentes (oxálicos y oxámicos) (19). Esta brecha de conocimiento —debido a la escasez de estudios comparativos sobre toxicidad residual y mineralización completa en matrices reales— pone de manifiesto la necesidad de reorientar los esfuerzos hacia estrategias que optimicen la generación de radicales hidroxilo (•OH) y minimicen los riesgos toxicológicos asociados a subproductos intermedios (20).

Procesos de ozonación, especialmente aquellos que incorporan catalizadores o se combinan con otras tecnologías avanzadas de oxidación (20), han demostrado una eficiencia significativamente mejorada en la degradación de contaminantes resistentes (21). En el caso específico del paracetamol (ACT), se ha documentado su rápida degradación mediante simple ozonación (9) , e incluso su eliminación completa se ha logrado mediante tratamientos mejorados utilizando micro-nanoburbujas de ozono o en combinación con electrólisis, alcanzando tasas de eliminación del 99,5%(22). La ozonización también puede mejorar la biodegradabilidad del efluente, facilitando tratamientos posteriores (9) .

Basándose en la evidencia informada en la literatura científica, se propone que la ozonización catalítica y los procesos híbridos basados en ozono muestran una mayor eficiencia en la degradación y mineralización del paracetamol en aguas residuales en comparación con la ozonización convencional, debido a la mayor generación de especies oxidantes altamente reactivas, especialmente los radicales hidroxilo (•OH). En este contexto, la presente revisión pretende no solo sintetizar avances científicos sobre la aplicación de tecnologías de ozonización para la eliminación del acetaminofén, sino también realizar un análisis crítico de sus limitaciones, identificando lagunas en la investigación relacionadas con la mineralización incompleta, la formación de subproductos tóxicos y la falta de estudios en matrices del mundo real (9,23)).

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

Metodología

Revisión bibliográfica

Este estudio realizó una revisión sistemática de la literatura acompañada de un análisis bibliométrico para evaluar tendencias científicas relacionadas con la degradación de la ACT mediante procesos avanzados de oxidación basados en ozono. La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus entre 1998 y 2025 para reflejar la evolución del interés en contaminantes farmacéuticos y tecnologías avanzadas de tratamiento**.**

Para identificar los estudios relevantes, se utilizaron palabras clave y operadores booleanos: (“acetaminofén” O “paracetamol”) Y (“ozonación” O “procesos avanzados de oxidación basados en ozono” O “O3 AOP” O “ozonación catalítica”) Y (“tratamiento de aguas residuales” O “solución acuosa” O “efluente”). Esta estrategia de búsqueda se aplicó específicamente a los títulos, resúmenes y palabras clave de las publicaciones para refinar los resultados y asegurar que los documentos estuvieran relacionados tanto con la relevancia ambiental del contaminante como con las tecnologías de tratamiento. Se aplicaron criterios de inclusión para seleccionar la literatura más relevante. Solo se incluyeron artículos científicos y artículos de revisión publicados en inglés.

Análisis bibliométrico

El análisis se centró principalmente en la co-ocurrencia de palabras clave (palabras clave del autor) para explorar los conceptos y temas principales relacionados con la degradación de las ACT mediante ozonación. Se estableció un mínimo de 5 ocurrencias por palabra clave como criterio de inclusión, junto con un umbral de relevancia de 12, lo que permitió filtrar los términos más significativos dentro del corpus analizado. Esta configuración ayudó a reducir el ruido bibliográfico y a centrar el análisis en los nodos más relevantes de la red temática.

Además de la coexistencia temática, se analizó la evolución temporal de las palabras clave, lo que nos permitió observar cambios en las tendencias de investigación a lo largo del tiempo. Para ello, VOSviewer asignó un color a cada término basado en el año medio de publicación en el que apareció, lo que facilitó identificar temas emergentes, establecidos o en declive dentro del campo de estudio.

Los mapas bibliométricos se construyeron utilizando el archivo exportado desde Scopus, que previamente había sido limpiado para eliminar duplicados y normalizar términos equivalentes (por ejemplo, “procesos avanzados de oxidación” y “AOPs”) (24). Los mapas generados muestran tanto la fuerza del vínculo entre términos como su frecuencia de ocurrencia, utilizando el método de conteo completo. La visualización resultante nos permitió identificar clústeres temáticos que representan subconjuntos de publicaciones con un alto grado de similitud semántica (25).

Este análisis bibliométrico proporcionó una base cuantitativa sólida para comprender la estructura y dinámica del conocimiento científico sobre el uso de la ozonación para la eliminación de ACTs, al tiempo que sirvió como base para identificar lagunas y oportunidades para futuras investigaciones.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

Resultados

Análisis bibliométrico de tendencias de investigación utilizando VOSviewer

El análisis bibliométrico nos permitió identificar la evolución y estructura de la producción científica relacionada con la eliminación de ACT mediante procesos de ozonización, utilizando 82 artículos publicados entre 1988 y 2025, como se muestra en la Figura 1.

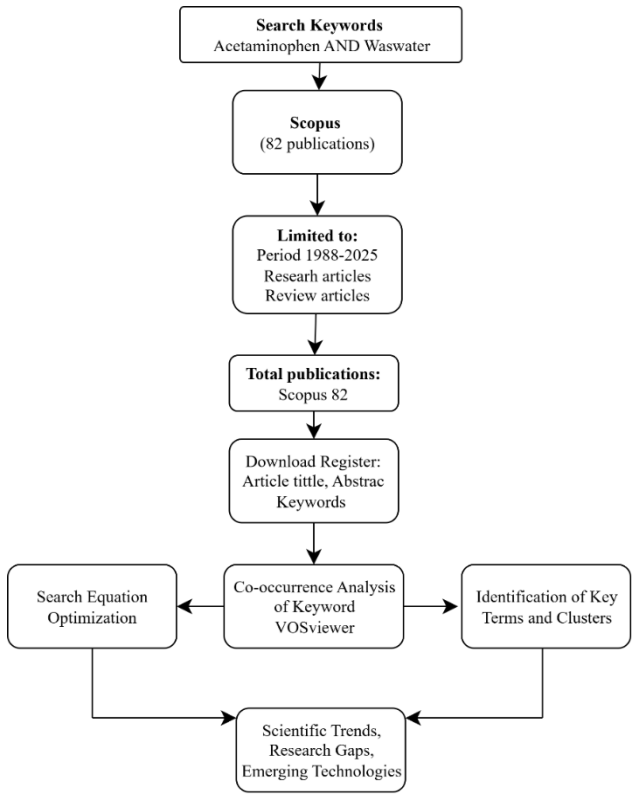


Figura 1. Proceso de selección y análisis bibliométrico en Scopus. Trabajo propio del autor (2025).

La evolución temporal de las publicaciones muestra un aumento sostenido a partir de 2013, con una concentración más intensa entre 2017 y 2022. Esta tendencia refleja una creciente preocupación por el impacto ambiental de los contaminantes farmacéuticos y un interés en aplicar tecnologías avanzadas como la ozonización y la ozonización catalítica en el tratamiento de aguas residuales.

La Figura 2 muestra el mapa de coocurrencia del término generado usando VOSviewer, que reveló que las palabras clave más frecuentes en el conjunto de datos analizado incluyen ozonación, acetaminofén, paracetamol, productos farmacéuticos, tratamiento de aguas residuales, ozonización catalítica, ozono, microcontaminantes, tratamiento de agua, y productos de transformación. Estas palabras se agrupan en grupos temáticos que permiten la visualización de líneas de investigación bien definidas. El término "ozonación" aparece como un nodo central, fuertemente vinculado a temas relacionados con contaminantes emergentes, productos de transformación y tecnologías avanzadas de oxidación, sugiriendo su papel dominante en la literatura actual. El análisis de densidad confirma que este término representa el mayor número de publicaciones y coocurrencias, seguido de "tratamiento de aguas residuales" y "productos farmacéuticos".

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

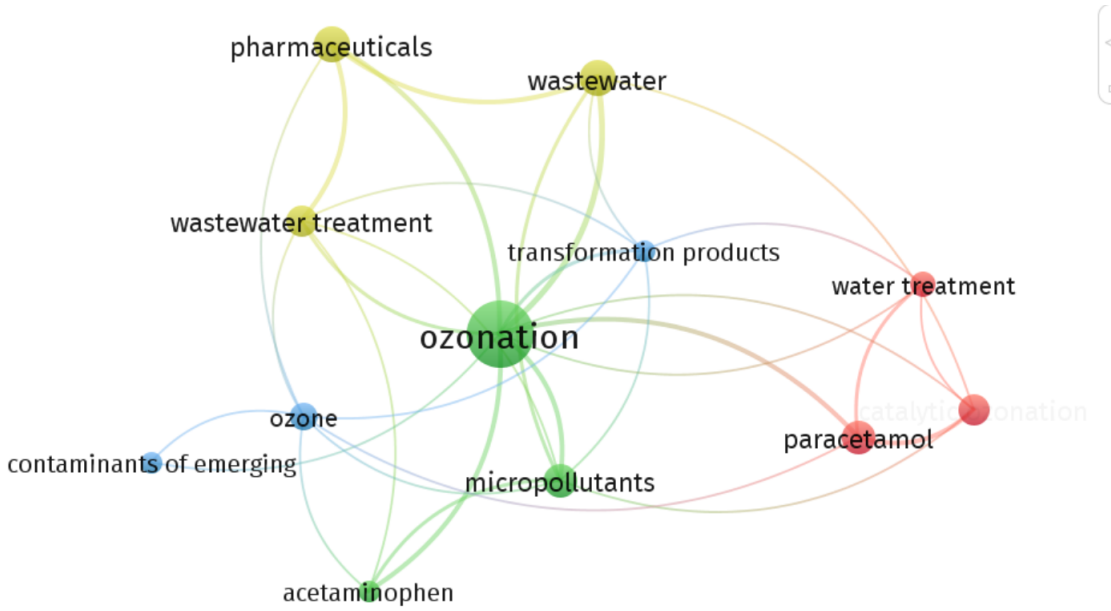


Figura 2. Mapa de coocurrencia de palabras clave relacionadas con el paracetamol en aguas residuales. Fuente: Preparado por los autores usando VOSviewer con datos exportados de Scopus (1988–2025).

A nivel de autores, instituciones y países, los resultados muestran una concentración significativa de investigación en países europeos y asiáticos, con contribuciones notables de China, España, Irán y Alemania. Las redes de coautoría sugieren la existencia de grupos de investigación establecidos, con colaboraciones interinstitucionales que han reforzado el desarrollo de estudios experimentales sobre la degradación del paracetamol y otras sustancias farmacéuticas. Las publicaciones vinculadas a universidades con líneas de investigación activas en procesos avanzados de oxidación reflejan la creciente madurez del campo y su especialización hacia tratamientos sostenibles.

La Figura 3, que muestra la evolución temporal, indica que conceptos como paracetamol, ozonación y microcontaminantes comenzaron a ganar protagonismo en la literatura alrededor de 2015, mientras que el término “ozonación catalítica” muestra un crecimiento más reciente, estableciéndose como un área emergente de investigación. Esto sugiere una transición del estudio de procesos convencionales hacia un interés en tecnologías más específicas y reactivas. Sin embargo, también se han identificado lagunas en estudios comparativos entre tecnologías, la evaluación de productos intermedios y análisis ecotoxicológicos integrales, reforzando la necesidad de futuras investigaciones experimentales orientadas a optimizar procesos como la ozonización catalítica utilizando materiales como la magnetita**.**

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

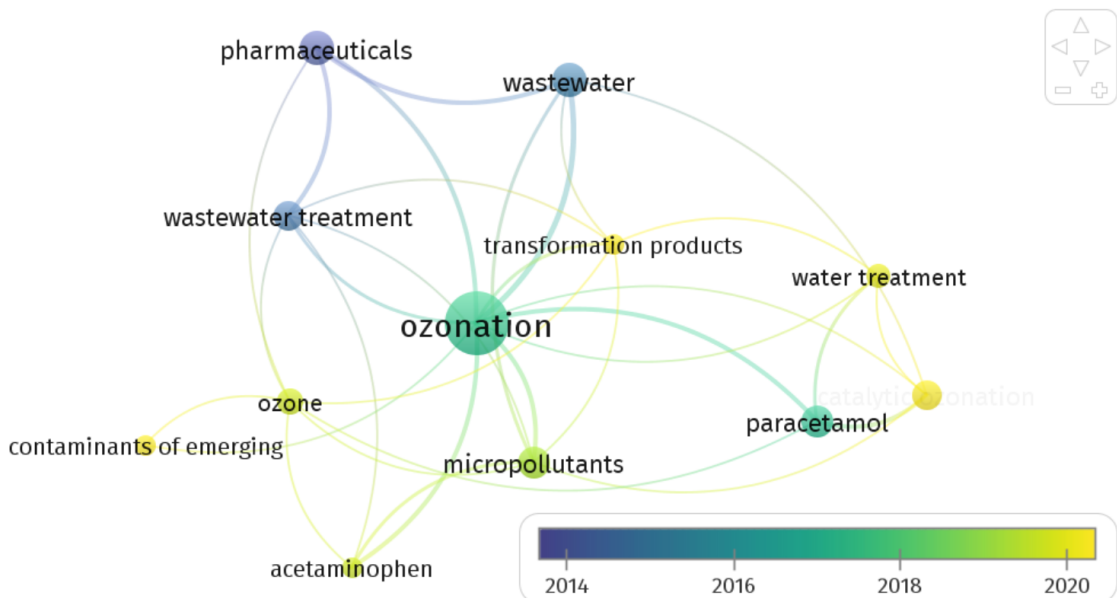


Figura 3. Red temporal de coincidencias de palabras clave relacionadas con el paracetamol en aguas residuales. Fuente: Preparado por los autores usando VOSviewer con datos exportados de Scopus (1988–2025).

Paracetamol en aguas residuales

El ACT es un fármaco analgésico y antipirético ampliamente utilizado en todo el mundo. Su ingesta anual global se estima en casi 1,45 toneladas métricas al año. Sin embargo, cabe señalar que esta estimación se basa en datos reportados en 2020 y que puede haber cambiado en años posteriores (26). Tras su consumo por humanos y animales, el 90% del ACT se excreta sin metabolizar o en formas conjugadas a través de la orina, entrando en sistemas de alcantarillado y, posteriormente, en plantas de tratamiento de aguas residuales (WWTPs) y otros ambientes acuáticos naturales (10,26). Además de la excreción, las descargas de las industrias farmacéuticas y la eliminación de medicamentos caducados o no utilizados también contribuyen significativamente a su presencia en el entorno acuático (8,26). Los efluentes hospitalarios son una fuente importante de conjugados de fármacos, genes de resistencia a antibióticos y metabolitos farmacéuticos (27). Se estima que el flujo anual de ACT en las plantas de tratamiento de aguas residuales oscila entre 292 y 585 toneladas métricas a nivel mundial, de las cuales solo aproximadamente el 80% se degrada durante el tratamiento, lo que resulta en la descarga de grandes cantidades en aguas naturales (8). La presencia de fármacos y sus metabolitos supone un riesgo para la salud global debido a su persistencia, bioacumulación y biomagnificación, lo que puede alterar el comportamiento y la salud reproductiva de los organismos acuáticos, favorecer la propagación de la resistencia a los antibióticos y causar desequilibrios ecológicos a largo plazo (28).

La presencia de ACT en el entorno acuático es motivo de preocupación debido a sus efectos ecotoxicológicos documentados. Se ha demostrado que los ACT pueden causar daños al código genético, degradación oxidativa de lípidos y desnaturalización de proteínas en las células, con toxicidad bien establecida en bacterias, algas, macrófitos, protozoos y peces (9,10). Específicamente,

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

analgésicos no narcóticos como el paracetamol pueden inducir estrés oxidativo en cianobacterias, reduciendo el contenido de clorofila y carotenoides e inhibiendo el crecimiento (11). Aunque presenta baja toxicidad a Daphnia (con efectos letales y reproductivos en el rango mg/L), el paracetamol puede inducir estrés oxidativo y disfunción reproductiva, especialmente en crustáceos (16). Concentraciones de ACT superiores a 1,8 µg/L pueden causar respuestas tóxicas en la vida acuática (8), y se ha observado que sus subproductos de degradación—como los Intermedios Aromáticos Primarios, Derivados Aromáticos Secundarios, Ácidos Carboxílicos Alifáticos y Ácidos Persistentes (oxálicos y oxámicos)—puede ser significativamente menos dañino que el compuesto original (29).

El ACT se detecta frecuentemente en diversas matrices acuáticas, incluyendo aguas residuales, superficiales y subterráneas (26). Las concentraciones en los influyentes de las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales (WWTP) oscilan entre no detectadas (ND) y 66.440.000 ng/L, mientras que se han reportado valores entre ND y 90.500 ng/L en los efluentes (30). La eliminación del paracetamol en las WWTP municipales convencionales oscila entre el 14,3% y el 100%, con una eficiencia media del 94,7% (30). A pesar de estas altas eficiencias en la eliminación, se han encontrado niveles de ACT en los efluentes WWTP de hasta 10 mg/L (17).

Un estudio realizado en España encontró que el acetaminofén fue muy eliminado (más del 70%) en las tres PMA investigadas. En las PMA con tratamiento avanzado, la concentración total de fármacos (diclofenaco, losartán, tramadol, O-desmetil-venlafaxina, clorpirifos y terbutrina), que era aproximadamente de 263 µg/L en el influente, se redujo a 14 µg/L en el efluente, demostrando una eficiencia superior al 90% para ACT (31). Sin embargo, la eliminación en efluentes hospitalarios en bruto muestra una variabilidad significativa, que va desde el 75,56% para lidocaína hasta el 100% para otros compuestos, con eficiencias de eliminación generales que oscilan entre el 10,23% y el 64,01% (14). En el caso del paracetamol, se detectó en el 100% de las muestras influyentes hospitalarias y en el 67% de las muestras de efluentes, demostrando su persistencia en aguas residuales hospitalarias y la necesidad de implementar procesos de tratamiento más eficientes para su eliminación (16). Los sistemas convencionales de lodos activados enfrentan desafíos para eliminar compuestos hidrofílicos como paracetamol, cafeína, metformina y ciertos antibióticos, lo que a menudo requiere tratamientos oxidativos avanzados (16).

Los riesgos emergentes asociados a la persistencia y toxicidad del ACT y sus productos de transformación subrayan la necesidad de un pretratamiento adecuado antes de la descarga para preservar la calidad ambiental y mitigar sus efectos nocivos (26). Durante la degradación del paracetamol mediante procesos avanzados de oxidación basados en la ozonización, puede generarse la transformación por subproductos como p-aminofenol, hidroquinona, benzoquinonas y diversos ácidos orgánicos de bajo peso molecular (32). Algunos de estos compuestos pueden mostrar mayor persistencia o toxicidad que el contaminante original, por lo que su identificación y evaluación son esenciales (32). Sin embargo, la información disponible sobre la toxicidad de varios de estos intermediarios sigue siendo limitada, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar metodologías para monitorizar la formación y evolución de los productos generados durante el tratamiento (23).

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

Procesos avanzados de oxidación basados en la ozonización

La ozonación, que utiliza ozono (O3), se ha consolidado como un proceso avanzado de oxidación eficaz para el tratamiento de aguas residuales industriales (33). El ozono, un gas inestable y tóxico, se convierte rápidamente en oxígeno ($_{O_2}$) y deben generarse continuamente in situ usando un ozonador (9). Este potente agente oxidante, con un potencial de reducción estándar (E°) de 2,07 V/SHE, es capaz de descomponer una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos (21,33). Su acción oxidativa se basa en dos mecanismos principales: la oxidación directa por moléculas de O3 y la oxidación indirecta mediante especies reactivas de oxígeno (ROS), particularmente los radicales hidroxilo (•OH) generados por la descomposición del ozono (21,34). El •OH, con un potencial de reducción de 2,8 V/SHE, es el agente oxidante más potente conocido en sistemas de ozonación (35,36). En términos simplificados, este proceso puede representarse mediante las siguientes reacciones:

$O_3 + OH^- \rightarrow HO_2^- + O_2$ (1)

$Ho_2^- \rightleftharpoons O_2\bullet^- + H^+$ (2)

$O_3 + O\square\bullet^- \rightarrow O_3\bullet^- + O_2$ (3)

$O_3\bullet^- + H^+ \rightarrow Ho_3\bullet$ (4)

$Ho_3\bullet \rightarrow \bullet OH + O_2$ (5)

En los sistemas de ozonación que utilizan solo ozono, la oxidación predominante de la TOC y sus subproductos ocurre mediante $_{O_3}$, con la participación de los radicales •OH generados (9). Sin embargo, la baja tasa de autólisis del ozono limita la producción suficiente de •OH, lo que restringe la eliminación de contaminantes difíciles de degradar y puede conducir a la formación de intermediarios del ácido carboxílico, reduciendo la tasa de mineralización (21). Por ejemplo, en un estudio, la ozonización convencional de efluentes tratados con 3-clorofenol y clorobenceno mostró una reducción en la toxicidad del efluente que osciló entre el 41% y el 83% durante los primeros cuatro días de almacenamiento a 22 °C (37). Aunque la ozonación simple es eficaz para la degradación del paracetamol, la mineralización de los compuestos orgánicos presentes suele ser limitada. En este sentido, se ha reportado una reducción del 51% en la COD tras 120 minutos de tratamiento, lo que indica mineralización parcial y la persistencia de subproductos de transformación, como el ácido oxálico (9) . Sin embargo, la ozonización directa resultó eficaz para la oxidación de la mayoría de los fármacos (>90%) en estudios controlados, aunque la eliminación del ibuprofeno solo fue posible combinando O3 con H_2O_2 (38).

La combinación de ozono y peróxido de hidrógeno (O3/H2O2), conocida como proceso peroxono, es un prometedor proceso avanzado de oxidación (AOP) que mejora significativamente la generación de radicales hidroxilo (33,39). Esta suma aumenta la eficiencia del proceso, ya que una molécula de $_{H_2O_2}$puede producir un radical •OH, en contraste con las tres moléculas de ozono necesarias para lograr el mismo efecto en la ozonación convencional (40). La O_3/H_2O_2 el proceso

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

logró eficiencias de degradación del 92% para el ketoprofeno (KET), 86% para diclofenaco (DCF) y 78% para su mezcla, con una mejora notable en la calidad fisicoquímica del efluente, incluyendo reducciones en la turbidez y conductividad, Causa de muerte, Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD5) y Carbono Orgánico Total (TOC) (38). Además, se observó una reducción sustancial en la toxicidad. La presencia de iones cloruro (Cl-) y bromuro (Br-) en la solución puede, en algunos casos, acelerar la degradación de la TOC en la radiación UV/H_2O_2 Proceso, debido a la generación sustancial de especies halógenas reactivas (41).

Los procesos de ozonización catalítica representan una mejora adicional respecto al tratamiento convencional con ozono al potenciar la conversión de O_3 a •OH (21). La ozonización catalítica heterogénea facilita la fácil separación del agua tratada, lo que contribuye a su viabilidad económica (21). Catalizadores a base de óxidos metálicos, como ZnO, CeO2, c-Al_2O_3, y MnO_2–CeO_2, han demostrado un excelente potencial catalítico(20). La dispersión de $_{CeO_2}$ nanopartículas en diatomita (CeO_2@DE) aumentó significativamente la degradación de la ciprofloxacina (CIP) del 47,2% al 94,2% y su mineralización al 76,8% (20). Para ACT, la ozonización utilizando un catalizador Fe3O4@Ce-UiO-66 logró un 90,2% de mineralización (42). El biomaterial magnético de carbono (Fe-N@BC) activó ozono para la degradación de tetraciclina (TC) con una eficiencia de hasta el 95,0% y una interferencia mínima de aniones coexistentes (42). La ozonización catalítica utilizando nanopartículas de MgO modificadas demostró una reducción del 87% en el ACT (9).

La eficiencia de la ozonización está fuertemente influenciada por factores como el pH, la temperatura y la composición de la matriz de agua (43). La degradación del ACT es más rápida a niveles de pH más altos (por ejemplo, pH 10,0 en comparación con pH 2,0 o pH neutro), debido a una oxidación más rápida de la forma fenolato del ACT —que es más reactiva— y a una mayor producción de •OH (9). Para la degradación del fenol a través de UV/H_2O_2, aumentando el pH de 3 a 8 atenuó los efectos inhibitorios y redujo la toxicidad aguda de los subproductos halogenados (41). En cuanto a la temperatura, afecta significativamente a la tasa y el alcance de la atenuación de biotoxicidad en los efluentes ozonizados, ya que temperaturas más altas facilitan una atenuación más rápida y completa de la toxicidad (37). La presencia de matrices complejas, como las aguas residuales reales, afecta significativamente la eficiencia de la ozonización (15,44). La materia orgánica disuelta (MOD) compite por el ozono disuelto y los radicales hidroxilo, reduciendo la concentración de oxidante disponible para los contaminantes de interés (44). Por lo tanto, en aguas residuales hospitalarias con altas concentraciones de DOM (hasta 500 mg/L), la ozonización directa puede ser económicamente inviable; en consecuencia, a menudo se utiliza como paso de pulido tras tratamientos biológicos, cuando la concentración de DOM es menor (6–8 mg/L) (44). Sin embargo, se ha demostrado la aplicabilidad de la ozonización simple para la remediación de sistemas de lodos activados multicomponentes y aguas residuales hospitalarias a gran escala (9).

En comparación con otros AOP, la ozonización ofrece ventajas claras. No requiere el transporte ni almacenamiento de materiales peligrosos, ya que el ozono se genera in situ (9). Tiene una mayor capacidad de oxidación que el cloro activo y otros métodos convencionales, y no produce subproductos orgánicos clorados en aguas residuales reales, eliminando la necesidad de dicloración (9). Además, el ozono tiene una vida media de 20 minutos en el agua, descomponiéndose fácilmente en O_2, que previene la toxicidad residual tras el tratamiento (9). En las plantas de

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

tratamiento de aguas residuales, la ozonización ha demostrado una mayor eficiencia en la eliminación de COD (9). Un estudio comparativo de seis diferentes AOPs para microcontaminantes mostró que la ozonización tenía el menor consumo energético entre los procesos evaluados (43). Otro estudio indicó que la ozonización tuvo la mayor eficiencia energética entre los cinco AOP investigados (15). Sin embargo, un estudio comparativo encontró que la ozonización directa no era eficiente para la degradación del paracetamol y la adición de $H._2O_2$ no resultó en una mejora significativa, mientras que la fotocatálisis heterogénea mostró un mejor rendimiento (64% de extirpación) (45). Esto pone de manifiesto la importancia de considerar condiciones específicas y las propiedades de los contaminantes.

Mecanismos de degradación del paracetamol por ozonización

La degradación de ACT por ozonación ocurre mediante oxidación directa por (O_3) moléculas y oxidación indirecta (21). La vía indirecta mediante •OH es especialmente eficaz para potenciar la mineralización de contaminantes(21). Los estudios han demostrado que, independientemente del proceso de ozonización utilizado, se detectan subproductos similares, lo que sugiere que los mismos agentes oxidantes (O_3 y •OH) actúan sobre contaminantes orgánicos (9). La degradación de ACT, en particular, puede seguir mecanismos iónicos o radicales; en el proceso iónico, O_3 atacan directamente la cadena aromática, mientras que en el proceso radical, HO• y/o O_2 Los radicales contribuyen a la formación de productos similares, compitiendo ambas vías (40). Se ha observado que la tasa de desaparición del fármaco es más rápida a niveles de pH más altos, lo que se atribuye a la oxidación más rápida de la forma fenolato de ACT (más reactiva a pH 10,0) y a una mayor producción de radicales •OH, que reaccionan más rápidamente con ACT que el ozono en sí (9). Aunque la ozonización directa es el proceso predominante en la oxidación de ACT y sus subproductos, que involucra a los radicales •OH generados, el grado de mineralización alcanzado tiende a ser bajo (9).

En cuanto a los intermediarios y productos finales, la ozonización de ACT produce hidroquinona y 2-hidroxi-4-(N-acetil)aminofenol, que a su vez pueden generar ácidos oxálicos y oxámicos (9). El ácido oxálico, en particular, ha demostrado ser un subproducto persistente debido a su resistencia a la oxidación por los radicales •OH (9). Una característica común en las secuencias de reacción propuestas para ACT es la pérdida inicial del grupo acetamida de ACT, lo que conduce a la formación de varios compuestos aromáticos mediante la oxidación de su grupo fenólico, o la hidroxilación directa de ACT (9). La ruptura posterior del anillo benceno da lugar a subproductos alifáticos que evolucionan en ácidos carboxílicos de cadena corta, transformándose finalmente en CO_2 y H_2O (9). El grupo acetamida también se oxida a CO_2, liberando NO_3^- y NH_4^+ Iones (9). Se ha comprobado que los subproductos de la p-benzoquinona dominan los cambios en fluorescencia y toxicidad, y su transformación mediante hidroxilación y reducción conduce a una disminución de la toxicidad de los productos resultantes (37). En el caso del paracetamol, la ozonización genera varios productos de transformación intermedia cuya toxicidad puede diferir de la del compuesto original. Aunque algunos estudios han informado de la formación de subproductos potencialmente más tóxicos durante la ozonización de compuestos aromáticos, la evidencia disponible sobre el acetaminofén no permite generalizar este comportamiento; por lo tanto, es necesario evaluar la toxicidad de los intermediarios y productos finales generados durante el tratamiento (37,46).

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

Las tasas de mineralización reportadas por la ozonación tienden a ser bajas, a pesar de las altas tasas de eliminación de los fármacos (46). Por ejemplo, para una concentración inicial de ACT de 50 mg/L, se observaron reducciones en la Demanda Química de Oxígeno (COD) del 35%, 39% y 65% a pH 2,0, pH natural y 10,0, respectivamente, tras 60 minutos de tratamiento (9). Un estudio encontró que, aunque la degradación completa del paracetamol se logró en 20 minutos, la reducción de la causa de la muerte fue solo del 51% tras 120 minutos (9). Un análisis cinético reveló que la degradación molecular es más rápida que la mineralización, confirmando la formación de compuestos intermedios orgánicos (29).

En cuanto a las evaluaciones de toxicidad tras el tratamiento, es crucial considerar que, incluso si se logra una degradación efectiva de los microcontaminantes, la formación de subproductos puede provocar un aumento de efectos adversos como la toxicidad y la actividad estrogénica (47) Este aumento de toxicidad se atribuye a la formación de productos de transformación intermedia del paracetamol, como el p-aminofenol, la hidroquinona y la p-benzoquinona. La p-benzoquinona muestra una alta reactividad química y la capacidad de inducir estrés oxidativo en organismos acuáticos, y puede mostrar una toxicidad mayor que la del compuesto original. Del mismo modo, se ha demostrado que la ozonización sin añadir peróxido de hidrógeno aumenta la toxicidad del efluente (38). Sin embargo, se ha observado que la biotoxicidad de los efluentes ozonizados disminuye gradualmente durante el almacenamiento, con reducciones que oscilan entre el 41% y el 83% en los primeros cuatro días a 22°C, y que la temperatura—pero no la luz natural—influye en esta atenuación de la toxicidad (37). En contraste, la fotolisis ozonizada con Fe^{3+} mostró un aumento en la ecotoxicidad hacia Daphnia magna debido a la presencia de este ion tóxico (9). Un proceso avanzado combinado de oxidación (O_3 y Electro-oxidación) ha demostrado reducir la toxicidad (rango de MTC del 48% al 100%) y los riesgos ambientales (despreciables para los compuestos originales, bajos para un compuesto) tras 4 horas de tratamiento (22). Además, se ha informado que la transformación produce una membrana híbrida y O_3Los procesos de /UV son ambientalmente benignos y no suponen riesgos significativos para la salud (48).

Sistemas catalíticos y combinados de ozonación

La ozonización catalítica y los sistemas combinados de ozonización han demostrado una mayor eficacia en la degradación del ACT y otros contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, superando a la ozonización directa en varios aspectos.

Ozonización catalítica heterogénea

Se han investigado diversos materiales catalíticos. Por ejemplo, un nanocompuesto de biocarbón dopado internamente con Fe-N (Fe-N@BC), sintetizado a partir de lodos de hierro y jacinto de agua, logró una eficiencia de eliminación de tetraciclina (TC) del 95,0% mediante ozonización catalítica (42). En el caso del paracetamol, la mineralización alcanzó el 99,2% mediante ozonización mediante un Fe_3O_4catalizador @Ce-UiO-66 en una proporción 1:1 (49). Otro estudio utilizó SnO_2 nanopartículas como catalizador, aumentando la degradación del ACT del 84% (con ozonación simple) al 98% en 20–30 minutos, y la mineralización del 34% al 83% (9). El principal agente oxidante identificado fue el radical •OH. Un Fe_3O_4El catalizador @Ce-MOF para ozono aumentó la reducción del ACT al 87% (en comparación con el 38% solo con ozono) a pH 5,6,

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

resultando en una eliminación del TOC del 55% frente al 14% con la simple ozonización (9). Dopado con hierro Moringa oleifera las cáscaras de semillas (Fe-MOSH) han mostrado una capacidad significativamente mayor de eliminación de ACT (Qmax de 17,48 mg/g a 44°C) que otros adsorbentes convencionales en la ozonización catalítica (34). Además, un nanocompuesto trimetálico nMZVCC demostró una actividad catalítica heterogénea mejorada para la degradación del ACT, logrando una eliminación del 95% en 180 minutos(50). Un estudio que aplicó la ozonización catalítica a aguas residuales farmacéuticas observó un Causa de muerte concentración en el efluente inferior a 50 mg/L (eficiencia de eliminación del 53–59%), cumpliendo con el estándar chino de descarga y demostrando una destrucción masiva de contaminantes aromáticos (51).

Sistemas combinados de ozonación (O3/H2O2 y O3/UV)

La combinación de ozono y peróxido de hidrógeno (O_3/H2O2) ha logrado eficiencias de degradación del 92% para KET, 86% para DCF y 78% para la mezcla KET+DCF, con reducciones significativas en turbidez y conductividad, Causa de muerte, y CUERPO$_5$ (38). Irradiación UV combinada con H_2O_2 se ha demostrado eliminar entre el 80% y el 90% de la DCF y el 80% del ibuprofeno en los 60 minutos posteriores a la irradiación(47). Un sistema híbrido que combina membranas de ultrafiltración (UF) con una O_3El proceso de /UV ha demostrado un gran potencial para la eliminación de productos farmacéuticos y de cuidado personal de aguas residuales reales (48). Este sistema, con pretratamiento de UF, logró una degradación favorable del paracetamol—80% en agua sin tratar y 95% en agua biológicamente tratada—tras 7 minutos de exposición a UV254 nm/1,5 mg· L^{-1}de O_3 (48). Sin embargo, la ozonación por sí sola, sin la adición de peróxido de hidrógeno, ha mostrado una eficiencia limitada y un aumento en la toxicidad de los efluentes (38).

Comparaciones de eficiencia, cinética y sinergia

En la comparación de las AOPs, la ozonización, la fotocatálisis y la descarga corona pulsada (PCD) en fase gaseosa alcanzaron tasas de eliminación superiores al 90% para todos los fármacos detectados (15). El proceso de descarga de corona pulsada mostró la mejor eficiencia energética (0,28 kWh·m^{-3}), seguido de la ozonización (0,55 kWh·m^{-3}), mientras que la fotocatálisis requería significativamente más energía (47 kWh·m^{-3}) (15). Aunque la fotocatálisis heterogénea mostró una mejor eliminación del ACT (64%) en comparación con la ozonización directa o la electro-peroxono (45), otros estudios indican que la electro-peroxono y la ozonización mostraron mejores resultados para la degradación del ACT bajo las condiciones investigadas (45). El proceso electro-peroxono ha demostrado ser más eficaz que la simple ozonización (9). Los procesos catalíticos de ozono potencian la degradación de contaminantes al promover la conversión de O_3 a •OH radicales (21). A diferencia de la ozonización, la ozonización sin la adición de $_{H_2O_2}$en el Sitio A se encontró una mala eliminación de la actividad de AhR (−84%) y de la actividad estrogénica (29%), atribuida a la mezcla de salmuera de ósmosis inversa con el efluente tratado (51). Otros centros de tratamiento (B, C y D) lograron eliminaciones del 50–91% para la actividad AhR y del 88–95% para la actividad estrogénica, lo que es mayor que observaciones previas para WWTP secundarios y probablemente se debe a procesos de tratamiento terciario (51). La biotoxicidad de los efluentes ozonizados disminuyó gradualmente durante el almacenamiento, siendo la temperatura —más que la luz natural— un factor que influye en la atenuación de la toxicidad (37). Es importante

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

señalar que la fotocatálisis por sí sola presenta una eficiencia de degradación relativamente baja (52). Una evaluación del ciclo de vida (LCA) para la eliminación del paracetamol indicó que la irradiación UV-C era más sostenible que la UV-C/H_2O_2 y procesos foto-Fenton impulsados por UV-C, principalmente debido a la ausencia de reactivos adicionales (53).

Aplicaciones piloto o a gran escala

La simple ozonización ha demostrado ser eficaz para eliminar ACT de lodos activados y aguas residuales hospitalarias en una planta piloto, con un bajo consumo energético de 19 MWh/año (9). En una planta de tratamiento secuencial —que incluía lodos activados, filtración por membrana, adsorción granular de carbón activado y ozonización— el ACT no se detectó tras el paso de filtración por membrana (9). De manera similar, en una planta piloto de tratamiento de aguas residuales hospitalarias, todo el ACT fue eliminado tras el proceso de biorreactor de membrana (MBR), y la posterior ozonización redujo otros fármacos en más de un 90% (9). Aproximadamente el 50% de los artículos revisados sobre ozonación se centran en el tratamiento de aguas residuales reales, destacando la aplicación práctica de esta tecnología (9). La ozonización se ha utilizado como un paso clave en muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (WWTP) (9). La inyección de ozono en los sistemas de lodos activados convencionales (CAS) o en el circuito de recirculación de licor mezclado mejoró significativamente la eliminación de fármacos, aumentando la reducción global del 49% (CAS sola) al 71–80% (con ozono) (44).

Retos y lagunas en la investigación

A pesar de sus ventajas y eficacia demostrada, las AOP basadas en ozono se enfrentan a limitaciones tecnológicas, especialmente en lo que respecta a la transferencia de ozono en agua debido a su baja solubilidad (9). Los altos costes operativos son una desventaja significativa de los AOP en comparación con los tratamientos biológicos convencionales (33). La generación de ozono en sí es un proceso que requiere equipos costosos (9). Además, el uso de ozono en combinación con otros AOP, como los sistemas O3/H2O2/UV, puede aumentar la demanda eléctrica (15). Los sistemas de ozonización catalítica, aunque prometedores, a menudo requieren procesos de síntesis de catalizadores complejos y costosos, lo que dificulta su aplicación industrial a gran escala (21). Aunque se han desarrollado tecnologías innovadoras como la ozonización USONiQ—que integra ultrasonidos para mejorar la transferencia de ozono y la formación de radicales hidroxilo, logrando una eliminación del 80% de microcontaminantes con una dosis específica de ozono reducida entre un 20% y un 70% en comparación con los sistemas estándar—una evaluación económica integral aún requiere más investigación (54).

Existe una notable falta de estudios realizados a gran escala o utilizando matrices complejas de aguas residuales. La mayoría de la investigación sobre AOPs se ha centrado en soluciones sintéticas en laboratorio, con solo un número limitado de estudios (9 de 91 para procesos tipo Fenton) que abordan aguas residuales reales (10). Esto subraya la necesidad crítica de más investigación en entornos complejos y a gran escala para validar la aplicabilidad industrial (55,56). La eficacia de los catalizadores, por ejemplo, puede inhibirse en matrices complejas debido a la competencia de materia orgánica natural para los EROs (21). Además, cuantificar las contribuciones relativas de los radicales de ozono e hidroxilo en aplicaciones a gran escala sigue siendo un desafío debido a la impracticabilidad de añadir eliminadores radicales por razones regulatorias y de seguridad (54).

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

Otra carencia significativa es la escasez de estudios exhaustivos sobre la toxicidad de los subproductos de degradación. La oxidación parcial de contaminantes orgánicos puede, paradójicamente, provocar la formación de subproductos más tóxicos que los compuestos originales (37,47). Aunque la ozonización es eficaz para degradar contaminantes, puede generar intermediarios dañinos que suponen riesgos para la seguridad y el medio ambiente (57). Por ejemplo, la ozonización de ciertos fármacos puede producir subproductos que conllevan mayores riesgos toxicológicos (32). En el caso del diclofenaco y el ketoprofeno, la ozonización sin añadir peróxido de hidrógeno aumentó en realidad la toxicidad del efluente, lo que lo hizo inadecuado para el tratamiento de aguas residuales (38). Aunque herramientas como el programa ECOSAR se utilizan para predecir la toxicidad de los subproductos (8,58), se necesitan análisis toxicológicos adicionales para evaluar completamente el riesgo ecotoxicológico de estos sistemas y asegurar que los AOP no introduzcan inadvertidamente nuevos contaminantes (58).

Por último, la integración de evaluaciones del ciclo de vida (ACL) o análisis coste-beneficio es esencial, aunque aún limitada. Se requieren estudios tecnoeconómicos para determinar la viabilidad y el tratamiento óptimo para la destrucción de contaminantes como el ACT(9). Las evaluaciones de ACL han demostrado que las diferencias en el impacto ambiental entre diferentes AOPs para la degradación del ACT suelen ser insignificantes, y los mayores impactos se atribuyen al transporte y preparación de la muestra más que al propio proceso de tratamiento (9). Esto pone de manifiesto la importancia de considerar el ciclo de vida completo de estas tecnologías para optimizar los procesos no solo en términos de eficiencia de retirada, sino también en términos de sostenibilidad ambiental y económica a largo plazo (53). La necesidad de desarrollar materiales catalíticos económicamente viables, reciclables y duraderos es imprescindible para la aplicación práctica generalizada de la ozonización catalítica (21).

Conclusiones

La revisión sistemática y el análisis bibliométrico revelaron un crecimiento sostenido del interés científico en la eliminación del paracetamol mediante procesos de ozonación, especialmente desde 2013. Las palabras clave predominantes y la evolución temporal de las publicaciones muestran una transición de estudios centrados en la ozonación convencional hacia enfoques más avanzados, como la ozonización catalítica y procesos avanzados de oxidación híbridos.

Los resultados analizados confirman que la ozonización es un método eficaz para la degradación del paracetamol; sin embargo, la ozonización catalítica funciona mejor porque promueve la generación de •OH, lo que aumenta significativamente la mineralización del contaminante y reduce la persistencia de compuestos intermedios. Catalizadores como la magnetita y varios óxidos metálicos han demostrado altas eficiencias en degradación y mineralización, alcanzando valores cercanos al 99%, superiores a los obtenidos mediante la ozonización convencional.

Además, se descubrió que la eficiencia de estos procesos depende de variables operativas como el pH, la temperatura, la dosis de ozono, el tipo catalizador y la composición de la matriz acuosa. Las condiciones alcalinas favorecen la formación de •OH, mientras que la presencia de materia orgánica disuelta puede reducir la disponibilidad de especies oxidantes y afectar el rendimiento del tratamiento.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

La revisión también mostró que sistemas híbridos, como O_3/H_2O_2, O_3/UV y electro-peroxono, presentan efectos sinérgicos que mejoran la degradación del paracetamol, reducen la toxicidad residual y aumentan la eficiencia global del proceso. Sin embargo, la formación de productos de transformación y la evaluación de su toxicidad siguen siendo áreas poco estudiadas.

Finalmente, se identificaron lagunas significativas de conocimiento relacionadas con la escasez de estudios piloto e industriales, la limitada evaluación ecotoxicológica de los subproductos generados y la falta de análisis integrales de viabilidad económica y sostenibilidad. Por lo tanto, la investigación futura debería centrarse en validar estas tecnologías en matrices reales, desarrollar catalizadores rentables y reutilizables, e incorporar evaluaciones del ciclo de vida y coste-beneficio para facilitar la transferencia de la ozonización catalítica del laboratorio a aplicaciones reales de tratamiento de aguas residuales.

Declaración de créditos de contribución de autoría

Conceptualización: Joseph Soto-Verjel, Laura Alvear-Ovallos, Edward Cely-Avellaneda, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno. Análisis formal: Joseph Soto-Verjel, Laura Alvear-Ovallos, Edward Cely-Avellaneda, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno. Adquisición de financiación: Dorance Becerra-Moreno. Investigación: Joseph Soto-Verjel, Laura Alvear-Ovallos, Edward Cely-Avellaneda, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno. Administración del proyecto: Joseph Soto-Verjel, Laura Alvear-Ovallos, Edward Cely-Avellaneda, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno. Supervisión: Joseph Soto-Verjel, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno. Validación: Joseph Soto-Verjel, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno. Visualización: Laura Alvear-Ovallos,Edward Cely-Avellaneda, Dorance Becerra-Moreno. Redacción – borrador original: Joseph Soto-Verjel, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno. Escritura – revisión y edición: Joseph Soto-Verjel, Luisa F. Ramírez-Ríos, Dorance Becerra-Moreno.

Implicaciones éticas: ninguna declarada. Conflictos de intereses: ninguno declarado. Financiamiento: ninguno declarado.

References

1. Khan S, Iqbal J, Deng C, Wenjing X, Galstyan H. Innovative desalination strategies for the removal of emerging pollutants in aquatic systems. Sep Purif Technol. julio de 2025;360:131241. doi:10.1016/j.seppur.2024.131241

2. Sarkar D, Panicker TF, Kumar Mishra R, Srinivas Kini M. A comprehensive review of production and characterization of biochar for removal of organic pollutants from water and wastewater. Water-Energy Nexus. diciembre de 2024;7:243-65. doi:10.1016/j.wen.2024.11.001

3. Lei M, Zhang L, Lei J, Zong L, Li J, Wu Z, et al. Overview of Emerging Contaminants and Associated Human Health Effects. BioMed Res Int. 2015;2015(1):404796. doi:10.1155/2015/404796

4. Jacobo-Marín D, Santacruz De León G. Contaminantes emergentes en el agua: Regulación en México, principio precautorio y perspectiva comparada. Rev Derecho Ambient. 22 de junio de 2021;15:51. doi:10.5354/0719-4633.2021.57414

5. Li Q, Zhao T, Zhu J, Ma M, Hou G, Fang M, et al. Designing ultrathin single and multilayered

Ti3C2TX MXene as photocatalysts for enhanced acetaminophen degradation in Photo-Fenton-like reactions. Chem Eng J. julio de 2025;516:163691. doi:10.1016/j.cej.2025.163691

6. Dos Santos DF, Moreira WM, De Araújo TP, Bergamasco R, Ostroski IC, De Barros MASD. Non-conventional processes applied for the removal of pharmaceutics compounds in waters: A review. Process Saf Environ Prot. noviembre de 2022;167:527-42. doi:10.1016/j.psep.2022.09.043

7. Nieto-Juárez JI, Sarzosa-Cano NR, Serna-Galvis EA, Torres-Palma RA, Fabregat-Safont D, Botero-Coy AM, et al. Evaluation of contaminants of emerging concern in surface waters (rivers and lake) from Peru: Occurrence and environmental risk assessment. Environ Int. junio de 2025;200:109522. doi:10.1016/j.envint.2025.109522

8. Qi Z, Zhong Q, Xu C, Huang L, Wang Y, Qi C, et al. Preparation of iron selenide decorated 1T/2H molybdenum disulfide catalysts for peroxymonosulfate activation: Effect of phase transition. Sep Purif Technol. marzo de 2025;355:129612. doi:10.1016/j.seppur.2024.129612

9. Peralta-Hernández JM, Brillas E. A critical review over the removal of paracetamol (acetaminophen) from synthetic waters and real wastewaters by direct, hybrid catalytic, and sequential ozonation processes. Chemosphere. febrero de 2023;313:137411. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.137411

10. Pacheco-Álvarez M, Picos Benítez R, Rodríguez-Narváez OM, Brillas E, Peralta-Hernández JM. A critical review on paracetamol removal from different aqueous matrices by Fenton and Fenton-based processes, and their combined methods. Chemosphere. septiembre de 2022;303:134883. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.134883

11. Singh S, Majumder A, Mandal P, Yadav MK. Analgesics in wastewater matrix: A comprehensive review on occurrence, toxicity, and sustainability assessment of biological, tertiary, and hybrid treatment processes. Environ Nanotechnol Monit Manag. junio de 2025;23:101039. doi:10.1016/j.enmm.2024.101039

12. Kyere-Yeboah K, Bique IK, Qiao X chen. Advances of non-thermal plasma discharge technology in degrading recalcitrant wastewater pollutants. A comprehensive review. Chemosphere. abril de 2023;320:138061. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.138061

13. Całus-Makowska K, Dziubi□ska J, Grosser A, Grobelak A. Application of the Fenton and photo-Fenton processes in pharmaceutical removal: New perspectives in environmental protection. Desalination Water Treat. enero de 2025;321:100949. doi:10.1016/j.dwt.2024.100949

14. Valdivia MT, Taggart MA, Pap S, Kean A, Pfleger S, Megson IL. Photocatalytic metallic nanomaterials immobilised onto porous structures: Future perspectives for at-source pharmaceutical removal from hospital wastewater and potential benefits over existing technologies. J Water Process Eng. abril de 2023;52:103553. doi:10.1016/j.jwpe.2023.103553

15. Skalska-Tuomi K, Kaijanen L, Monteagudo JM, Mänttäri M. Efficient removal of pharmaceuticals from wastewater: Comparative study of three advanced oxidation processes. J Environ Manage. febrero de 2025;375:124276. doi:10.1016/j.jenvman.2025.124276

16. Tao W, Zheng X, Liu P, Zhang Y, Di B, Qiao H. Occurrence and removal of pharmaceuticals in hospital wastewater and the contribution to wastewater treatment plants. Environ Res. agosto de 2025;279:121752. doi:10.1016/j.envres.2025.121752

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

17. Dharman RK, Mariappan A, Oh TH. Engineering bandgap energy of MoO3 nanorod heterostructure using AgVO3 for efficient photocatalytic degradation of antibiotic pollutant. Environ Res. marzo de 2025;268:120829. doi:10.1016/j.envres.2025.120829

18. Vinayagam V, Palani KN, Ganesh S, Rajesh S, Akula VV, Avoodaiappan R, et al. Recent developments on advanced oxidation processes for degradation of pollutants from wastewater with focus on antibiotics and organic dyes. Environ Res. enero de 2024;240:117500. doi:10.1016/j.envres.2023.117500

19. Zhou X, Lu L, Li X, Meng F, Ding Z, Li Z, et al. Mechanism and effect of magnetic biochar on the removal of norfloxacin from water by ozone peroxidation adsorption-coagulation process. J Water Process Eng. enero de 2025;69:106655. doi:10.1016/j.jwpe.2024.106655

20. Nguyen LH, Thi TDT, Le MT, Thi TDN, Le Luu T, Lam QH, et al. Promoted catalytic ozonation by CeO2 supported on natural diatomite mineral for effective removal of ciprofloxacin antibiotic from wastewater. J Water Process Eng. mayo de 2025;74:107869. doi:10.1016/j.jwpe.2025.107869

21. Wen Q, An X, Huang B, Zhang J, He CS, Zou J, et al. Catalytic ozonation for hospital wastewater treatment: Challenge of simultaneous removal of pharmaceutical contaminants and pathogenic microorganisms. Chem Eng J. julio de 2025;515:163644. doi:10.1016/j.cej.2025.163644

22. Bączkowska E, Pierpaoli M, Gamo F, Luczkiewicz A, Fudala-Ksiazek S, Bray R, et al. On-site medical wastewater treatment enabling sustainable water reclamation: Merged advanced oxidation process for disinfection, toxicity, and contaminants removal. J Water Process Eng. abril de 2025;72:107562. doi:10.1016/j.jwpe.2025.107562

23. Rohan Khizer M, Saddique Z, Imran M, Javaid A, Latif S, Mantzavinos D, et al. Polymer and graphitic carbon nitride based nanohybrids for the photocatalytic degradation of pharmaceuticals in wastewater treatment – A review. Sep Purif Technol. diciembre de 2024;350:127768. doi:10.1016/j.seppur.2024.127768

24. Kerketta A, Sahoo PK. A decadal analysis to unravel the global status of emerging contaminants in wastewaters and comparison with the Indian context. Groundw Sustain Dev. agosto de 2022;18:100803. doi:10.1016/j.gsd.2022.100803

25. Madariaga-Segovia P, Párraga S, Villamar-Ayala CA. Removal of triclosan, ibuprofen, amoxicillin and paracetamol using organic residues under a bibliometric-statistical analysis. Bioresour Technol Rep. septiembre de 2023;23:101564. doi:10.1016/j.biteb.2023.101564

26. Bakhtshokouhi S, Assadi A. Examining sulfate radical-based enhanced oxidation techniques to degradation pharmaceutically active substances in aqueous media: With acetaminophen serving as a case study. J Hazard Mater Adv. febrero de 2025;17:100599. doi:10.1016/j.hazadv.2025.100599

27. Singh G, Singh A, Kumar Mishra V. A critical review of occurrence, sources, fate, ecological risk, and health effect of emerging contaminants in water and wastewater. Environ Nanotechnol Monit Manag. diciembre de 2024;22:100994. doi:10.1016/j.enmm.2024.100994

28. Soni S, Kumari A, Kumari S, Sharma A, Sheel V, Bhatia SK, et al. Base metals (Ni, Cu, Zn, Fe) oxide nanomaterials mediated photo/sono-catalytic removal of emerging pharmaceutical contaminants from wastewater. J Environ Chem Eng. diciembre de 2024;12(6):114683. doi:10.1016/j.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15651

jece.2024.114683

29. Vieira Y, Leichtweis J, Zanella R, Badawi M, Dotto GL. Tuning of electronic activation and mechanisms in chalcopyrite/MWCNT ordered catalyst for microwave-assisted H2O2/driven degradation of paracetamol and naproxen. J Water Process Eng. junio de 2025;75:107908. doi:10.1016/j.jwpe.2025.107908

30. Wu J le, Liu Z hua, Ma Q guang, Dai L, Dang Z. Occurrence, removal and risk evaluation of ibuprofen and acetaminophen in municipal wastewater treatment plants: A critical review. Sci Total Environ. septiembre de 2023;891:164600. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164600

31. Simarro-Gimeno C, Otoukesh M, Serna Galvis EA, Torres-Palma RA, Pitarch E, Hernández F. Investigation of organic micropollutants in urban wastewater and the feasibility of reusing treated wastewater for irrigation purposes. J Environ Chem Eng. junio de 2025;13(3):116216. doi:10.1016/j.jece.2025.116216

32. Zakhia A, Balestra LB, Dhainaut J, Merlier F, Boussetta N. Review on the removal and degradation methods of chloridazon and its metabolites. Sep Purif Technol. diciembre de 2025;376:133998. doi:10.1016/j.seppur.2025.133998

33. Mukherjee J, Lodh BK, Sharma R, Mahata N, Shah MP, Mandal S, et al. Advanced oxidation process for the treatment of industrial wastewater: A review on strategies, mechanisms, bottlenecks and prospects. Chemosphere. diciembre de 2023;345:140473. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.140473

34. Ikhlaq A, Nawab H, Yasar A, Naeem A, Akram A, Qazi UY, et al. Catalytic ozonation for the removal of methyl orange in water using iron-coated Moringa oleifera seeds husk. Process Saf Environ Prot. julio de 2025;199:107248. doi:10.1016/j.psep.2025.107248

35. Nabintu Kajoka C, Brosillon S, Reibel C, Diop YK, Oliveira M, Rocher V, et al. Removal of Pharmaceuticals Through Uv-C/Performic Acid Advanced Oxidation Process: Kinetics and Identification of Reactive Species [Internet]. Elsevier BV; 2024 [citado 22 de julio de 2025]. Disponible en: https://www.ssrn.com/abstract=4777071 doi:10.2139/ssrn.4777071

36. Shen Z, Bi X, Jian L, Jiang Y, Yang Z, Li Z, et al. Photocatalytic activation of peroxymonocarbonate with a TiO2 catalyst for water remediation. J Environ Manage. abril de 2025;379:124871. doi:10.1016/j.jenvman.2025.124871

37. Wei J, Cheng C, Tang W, Cheng Q, Zheng M, Ma D. A comprehensive analysis of storage impact on toxicity assessment of ozonated effluents. J Hazard Mater. marzo de 2025;486:136964. doi:10.1016/j.jhazmat.2024.136964

38. Cavalheri PS, Da Silva TF, Miguel EDSC, Canatto AK, Magalhães Filho FJC, Cavalcante RP, et al. Enhanced Degradation and Toxicity Reduction of Diclofenac and Ketoprofen Using Uasb Reactor and O3/H2o2 at Neutral Ph [Internet]. Elsevier BV; 2025 [citado 22 de julio de 2025]. Disponible en: https://www.ssrn.com/abstract=5117728 doi:10.2139/ssrn.5117728

39. Ye Q, Hunter TN, Xu H, Harbottle D, Kale GM, Tillotson MR. Synergistic effect of Fe and Ni on carbon aerogel for enhanced oxygen reduction and H2O2 activation in electro-Fenton process. Sep Purif Technol. enero de 2025;353:128436. doi:10.1016/j.seppur.2024.128436

40. Singh V, Gupta SP, Samanta SK. Water resource rejuvenation via AOP based degradation of pharmaceuticals extensively used during COVID-19. J Water Process Eng. noviembre de 2024;67:106137. doi:10.1016/j.jwpe.2024.106137

41. Yang B, Qiu Y, Luo Q, Huang X, Li Y, Zhou S, et al. Unveiling the neglected impacts of halide ions on phenol removal in UV/H2O2 system: Light shielding and oxidant utilization efficiency. J Water Process Eng. enero de 2025;69:106682. doi:10.1016/j.jwpe.2024.106682

42. Lv M. Resource utilization of iron sludge: Synthesis of high performance Fe N internal doped biochar to catalyze the ozonation degradation of tetracycline. J Water Process Eng. febrero de 2025;70:106758. doi:10.1016/j.jwpe.2024.106758

43. Patel M, Mansoor Ahammed M. Characteristics and removal of organic micropollutants in reverse osmosis concentrate from urban wastewater treatment plants: A review. Waste Manag Bull. diciembre de 2024;2(4):249-60. doi:10.1016/j.wmb.2024.11.012

44. Pariente MI, Segura Y, Álvarez-Torrellas S, Casas JA, De Pedro ZM, Diaz E, et al. Critical review of technologies for the on-site treatment of hospital wastewater: From conventional to combined advanced processes. J Environ Manage. octubre de 2022;320:115769. doi:10.1016/j.jenvman.2022.115769

45. O.S. Santos G, Sánchez-Montes I, M. Cordeiro-Junior PJ, O. Silva T, Rodrigo MA, R.V. Lanza M. Sustainable ferrocene for enhanced heterogeneous photoelectro-Fenton: A novel application in gas diffusion electrodes. J Environ Chem Eng. abril de 2025;13(2):115524. doi:10.1016/j.jece.2025.115524

46. Humayun S, Hayyan M, Alias Y. A review on reactive oxygen species-induced mechanism pathways of pharmaceutical waste degradation: Acetaminophen as a drug waste model. J Environ Sci. enero de 2025;147:688-713. doi:10.1016/j.jes.2023.11.021

47. Komorowska-Kaufman M, Zembrzuska J. Application of oxidation processes in wastewater quaternary treatment for organic compounds, antibiotics and nonsteroidal anti-inflammatory drugs removal and disinfection. Desalination Water Treat. enero de 2025;321:101059. doi:10.1016/j.dwt.2025.101059

48. Kim J, Lee JW, Park S, Jeon S, Lee K, Kim JO. Performance evaluation of ceramic and polymeric membrane application in hybrid system (membranes + O3/UV) for pharmaceutical and personal care products (PPCPs) removal from hospital wastewater. J Hazard Mater. septiembre de 2025;495:138804. doi:10.1016/j.jhazmat.2025.138804

49. Mohebali H, Moussavi G, Karimi M, Giannakis S. Catalytic ozonation of Acetaminophen with a magnetic, Cerium-based Metal-Organic framework as a novel, easily-separable nanocomposite. Chem Eng J. 15 de abril de 2022;434:134614. doi:10.1016/j.cej.2022.134614

50. Rahman F. Trimetallic magnetic nano-composite: A proficient heterogeneous Fenton-like catalyst for methylene blue and paracetamol degradation. Inorg Chem Commun. agosto de 2025;178:114570. doi:10.1016/j.inoche.2025.114570

51. Lewis P, Neale PA, Tan H, Leeder J, O'Malley E, Taylor MP, et al. A bioanalytical and chemical approach for wastewater discharge: Beyond detected chemicals for water quality assessment. Environ Pollut. octubre de 2025;383:126807. doi:10.1016/j.envpol.2025.126807

52. Jiang L, Lu Q, Chen H, Su Y, Zeng G, Li M, et al. Visible light-activated porphyrinic zirconium metal-organic framework for ultrafast photo-Fenton-like reaction: Efficient internal and external conduction mechanism of photogenerated electrons. Sep Purif Technol. julio de 2025;362:131937. doi:10.1016/j.seppur.2025.131937

53. López-Timoner R, Santos-Juanes L, Amat AM, Arfelli F, Cespi D, Passarini F, et al. Life cycle assessment of UVC-based advanced oxidation processes as quaternary treatments: Clostridium spp. inactivation and comparison with CECs removal. Sci Total Environ. abril de 2025;972:179029. doi:10.1016/j.scitotenv.2025.179029

54. Guerrero-Granados KF, Sanchez AB, Moker A, Boergers A, Schastok S, Kube C, et al. Performance Evaluation of the Usoniq Ozonation as Advanced Wastewater Treatment [Internet]. Elsevier BV; 2025 [citado 17 de julio de 2025]. Disponible en: https://www.ssrn.com/abstract=5177502 doi:10.2139/ssrn.5177502

55. Brillas E, Manuel Peralta-Hernández J. Removal of paracetamol (acetaminophen) by photocatalysis and photoelectrocatalysis. A critical review. Sep Purif Technol. marzo de 2023;309:122982. doi:10.1016/j.seppur.2022.122982

56. Mohammadzadeh M, Bello A, Lassen SB, Brandt KK, Risteelä S, Leiviskä T. Pilot-scale adsorption of pharmaceuticals from municipal wastewater effluent using low-cost magnetite-pine bark: Regeneration/enumeration of viable bacteria with a study on their biotoxicity. Environ Res. marzo de 2025;268:120774. doi:10.1016/j.envres.2025.120774

57. Zhang W, Nomura Y, Fukahori S, Kiso T, Myoujin K, Fujiwara T. Ecotoxicity mitigation and biodegradability enhancement during sulfamethazine removal by a pilot-scale rotating advanced oxidation contactor equipped with TiO2–zeolite composite sheets. J Environ Manage. marzo de 2025;377:124621. doi:10.1016/j.jenvman.2025.124621

58. Luo W, Deng L, Xu B, Hu J, Xue Q, Mao Y, et al. The diverse roles of bromide in the degradation of tinidazole during UV-LED/chlorine process at different wavelengths: Kinetics, radical contribution, and degradation pathway. Sep Purif Technol. enero de 2025;353:128404. doi:10.1016/j.seppur.2024.128404