

A comprehensive evaluation of methods for the removal of pharmaceutical contaminants in wastewater: A systematic review of the literature.

Rosa Ginefer Ramos Chipana , Shirley Xiomara Puma Sencia , Giancarlo F. Sanchez Chavez , Gerby G. Rondán Sanabria 
, ^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18100847@utp.edu.pe, U17210774@utp.edu.pe, C17401@utp.edu.pe, C16238@utp.edu.pe

Abstract—The growing concern about the presence of pharmaceutical contaminants in wastewater worldwide is of vital importance, the reason is that not having a correct disposal of these wastes can have negative impacts on human health and also on aquatic ecosystems, this supported by studies that show these adverse effects. This review aims to conduct a comprehensive evaluation of methods for removing pharmaceutical contaminants in wastewater. Despite previous research, the lack of consensus on the effectiveness of these techniques persists, generating the need to address this problem with updated information. The methodology includes an exhaustive search of scientific articles, using the PICO-PRISMA method to focus the research. After applying inclusion and exclusion criteria, 50 studies were selected for analysis, and the information was organized in a structured matrix. The results reveal a continuous presence of pharmaceutical residues in wastewater, highlighting the significant release of antibiotics and analgesics. Among the methods evaluated for the elimination of

pharmaceutical contaminants in wastewater, reverse osmosis and nanofiltration stand out as the most effective techniques for the elimination of these compounds. The urgency of addressing this emerging problem, highlighting the variability in the efficiency of the methods, depending on the type of drug present. In the conclusion, the importance of demonstrating the significant presence of drugs in high concentrations such as naproxen, paracetamol and ibuprofen in municipal wastewater is highlighted, as well as the significant presence of antibiotics such as norfloxacin and ofloxacin in hospital wastewater. It was also found that the integration or combination of methods is ideal to have a more efficient elimination of these wastes.

Keywords: pharmaceutical contaminants, wastewater, removal methods, reverse osmosis, nanofiltration.

A comprehensive evaluation of methods for the removal of pharmaceutical contaminants in wastewater: A systematic review of the literature.

Rosa Ginefer Ramos Chipana , Shirley Xiomara Puma Sencia , Giancarlo F. Sanchez Chavez , Gerby G. Rondán Sanabria 
, ^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18100847@utp.edu.pe, U17210774@utp.edu.pe, C17401@utp.edu.pe, C16238@utp.edu.pe

Abstract—The growing concern about the presence of pharmaceutical contaminants in wastewater worldwide is of vital importance, the reason is that not having a correct disposal of these wastes can have negative impacts on human health and also on aquatic ecosystems, this supported by studies that show these adverse effects. This review aims to conduct a comprehensive evaluation of methods for removing pharmaceutical contaminants in wastewater. Despite previous research, the lack of consensus on the effectiveness of these techniques persists, generating the need to address this problem with updated information. The methodology includes an exhaustive search of scientific articles, using the PICO-PRISMA method to focus the research. After applying inclusion and exclusion criteria, 50 studies were selected for analysis, and the information was organized in a structured matrix. The results reveal a continuous presence of pharmaceutical residues in wastewater, highlighting the significant release of antibiotics and analgesics. Among the methods evaluated for the elimination of pharmaceutical contaminants in wastewater, reverse osmosis and nanofiltration stand out as the most effective techniques for the elimination of these compounds. The urgency of addressing this emerging problem, highlighting the variability in the efficiency of the methods, depending on the type of drug present. In the conclusion, the importance of demonstrating the significant presence of drugs in high concentrations such as naproxen, paracetamol and ibuprofen in municipal wastewater is highlighted, as well as the significant presence of antibiotics such as norfloxacin and ofloxacin in hospital wastewater. It was also found that the integration or combination of methods is ideal to have a more efficient elimination of these wastes.

Keywords: pharmaceutical contaminants, wastewater, removal methods, reverse osmosis, nanofiltration.

RESUMEN

La creciente preocupación por la presencia de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales a nivel mundial es de vital importancia la razón es que, al no tener una correcta eliminación de estos residuos puede traer consigo impactos negativos en la salud humana y también a los ecosistemas acuáticos, esto respaldada por estudios que evidencian estos efectos adversos. Esta revisión tiene como objetivo realizar una evaluación integral de los métodos de eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales. A pesar de investigaciones previas, persiste la falta de consenso sobre la efectividad de estas técnicas, generando la necesidad de abordar esta problemática con información actualizada. La metodología incluye una exhaustiva búsqueda de artículos científicos, utilizando el método PICO-PRISMA para focalizar la investigación. Tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 50 estudios para el análisis, y

la información se organizó en una matriz estructurada. Los resultados revelan una presencia continua de residuos farmacéuticos en aguas residuales, destacando la liberación significativa de antibióticos y analgésicos. Entre los métodos evaluados para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, la osmosis inversa y la nanofiltración sobresalen como las técnicas más efectivas para la eliminación de estos compuestos. La urgencia de abordar este problema emergente, resaltando la variabilidad en la eficiencia de los métodos, dependiendo del tipo de fármaco presente. En la conclusión, se destaca la importancia de evidenciar la presencia significativa de fármacos en elevadas concentraciones como el naproxeno, paracetamol e ibuprofeno en las aguas residuales municipales, asimismo la presencia significativa de antibióticos como la norfloxacin y la ofloxacin en las aguas residuales hospitalarias. También se halló que la integración o combinación de métodos es ideal para tener una eliminación más eficiente de estos residuos.

Palabras clave: contaminantes farmacéuticos, aguas residuales, métodos de eliminación, osmosis inversa, nanofiltración.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación en la comunidad científica y ambiental sobre la detección de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales ha sido respaldada por estudios que evidencian la presencia de diversos compuestos, como analgésicos, antibióticos, hormonas y otros productos farmacéuticos, con potenciales impactos negativos en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos [1]. A pesar de la existencia de investigaciones previas que han identificado estos contaminantes y métodos propuestos para su eliminación, persiste una falta de consenso sobre la efectividad y sostenibilidad de dichas técnicas [2], [3]. La falta de claridad y consenso en la eficacia de los métodos para eliminar contaminantes farmacéuticos en aguas residuales constituye un problema relevante, ya que, aunque se han realizado numerosos estudios, las tendencias y perspectivas actuales en este campo son variables, y se observan discrepancias en los resultados y enfoques. Además, se han identificado vacíos de conocimiento, especialmente en la comparación integral de estos métodos, complicando la toma de decisiones informadas por parte de los responsables de la gestión del agua. La motivación detrás de esta Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) radica en

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

proporcionar una visión comprehensiva y actualizada de los métodos empleados para eliminar contaminantes farmacéuticos en aguas residuales [4]. La relevancia de este análisis se extiende a la comunidad científica y a los encargados de la gestión del agua. La información derivada de esta revisión podría contribuir a reconocer prácticas más efectivas en la eliminación de contaminantes farmacéuticos, con implicaciones significativas para la salvaguardia de la salud pública y del entorno ambiental. El objetivo principal de esta RSL es ofrecer una evaluación integral de los métodos de eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, con el fin de reducir los niveles de contaminación del agua [5]. La estructura de la revisión estará organizada en secciones que abordarán diversos métodos, como la oxidación avanzada, la adsorción, la biodegradación y otras estrategias, analizando sus ventajas, desventajas y aplicaciones específicas. Además, se llevará a cabo una evaluación crítica de la literatura existente, destacando las tendencias y discrepancias encontradas en los estudios revisados.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación constituye una revisión sistemática de la literatura acerca de los métodos destinados a la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales. Para ello, se ha llevado a cabo la revisión exhaustiva de artículos científicos relacionados con la evaluación de dichos métodos. Durante el proceso de recopilación de información, se emplearon bases de datos reconocidas, entre las cuales destaca Scopus. Además, se implementó el método PICO-PRISMA, cuya estructura se detalla en la Tabla I, facilitando la organización y focalización de nuestra revisión a través de la pregunta ¿Qué métodos de gestión de residuos farmacéuticos existen para disminuir los niveles de contaminación del agua contaminada? La búsqueda se llevó a cabo utilizando palabras clave, mediante la combinación del operador de búsqueda compleja (OR).

**TABLA I
PASOS PARA LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN**

		Palabras clave	Palabras clave en inglés
P	Problema / Población	Contaminación del agua	Pharmaceutical residues; effluent; Emerging pollutants; Wastewater; Antibiotic residues; pharmaceutical effluent; Pharmaceutical industry Pharmaceutical contaminant, pharmaceuticals human health
I	Intervención	Métodos para el tratamiento de agua	Technology; Process; tools; strategies; water treatment; methods, bioremediation, Adsorption, practices

C	Comparación	Comparación de los métodos	Comparison; Questionnaires; results Chemical, physical and biological.
O	Resultados	Nivel de descontaminación o estándares permitidos	Recovery; eliminate toxins; clean water; decontaminated water; purified, biodegradation

Asimismo, se emplearon criterios de inclusión Fig. 1 donde los estudios incluidos deben abordar sobre la contaminación del agua debido a los residuos farmacéuticos, residuos farmacéuticos para salud humana, métodos mediante el uso de la tecnología para tratar el agua y que estudios se hayan desarrollado en plantas de tratamiento de agua.

Por otro lado, se excluyeron por temporalidad, considerando fuentes no mayores a cinco años. Además, se excluyeron aquellos relacionados con residuos farmacéuticos veterinarios y residuos de productos químicos debido a las diferencias en la naturaleza y origen de dichos residuos, dado que la atención de la revisión se enfoca en los desechos farmacéuticos vinculados a la salud humana. También se eliminaron los artículos que carecían de información relevante sobre métodos para reducir la contaminación del agua. En ese mismo sentido, se descartaron las fuentes que no ofrecían acceso completo o que tenían costos asociados. Finalmente, se identificaron y eliminaron fuentes con duplicidad o redundancia de información para evitar repeticiones innecesarias en la revisión. Tras un análisis exhaustivo y una búsqueda detallada, se aplicó un filtro final que resultó en la selección de 50 trabajos para el análisis. A continuación, en la Fig. 1 se presenta el esquema con los aspectos que se tuvieron en cuenta para quedarnos con los artículos de esta revisión.

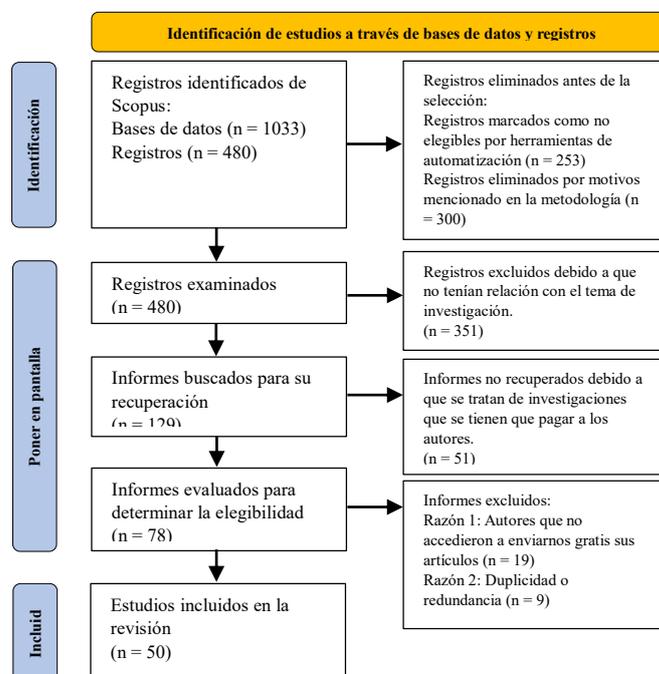


Fig. 1 Selección de artículos según la metodología PRISMA
Después de la selección de los artículos pertinentes, se procedió a la elaboración de una matriz para organizar la información de manera estructurada. Los datos se segmentaron según a los siguientes datos: año, país y técnicas abordadas en cada estudio. Este método simplificó la categorización de la información, lo que posibilitó un análisis claro y de los artículos seleccionados.

III. RESULTADOS

En la Tabla II, se detalla los datos relevantes de los artículos seleccionados, como: el título, su año de publicación, el país de origen, los tipos de técnicas que algunas son mucho más conocidas que otras como los lodos activados, la membranas, oxidación, nanofiltración entre otros pero también tenemos a los POA o procesos de oxidación avanzada que también son considerados altamente efectivos, para seleccionar el método adecuado es esencial identificar y clasificar los residuos farmacéuticos presentes y controlar las emisiones del tratamiento, otro punto a tener en cuenta es el tema del costo ya que algunos son relativamente altos debido al uso de energía, equipamiento, las revisiones y seguimiento que se le debe dar.

TABLA II
MATRIZ DE REGISTRO DE MÉTODOS DE ELIMINACION DE FÁRMACOS UTILIZADOS EN DIFERENTES PAÍSES

Título	Año	País	Técnicas
[1]	2023	Sudáfrica	Value Stream Map (VSM)
[2]	2021	China	Sistema MBR
[3]	2022	No específica	No específica
[4]	2023	Países bajos	Procesos de oxidación avanzada (POA)
[5]	2023	España y Portugal	Tratamientos primarios y secundarios con lodos activados
[6]	2022	China	Oxidación avanzada por radicales de sulfato fotoactivado (SR-AOP)
[7]	2022	Polonia, Dinamarca	Las lacasas inmovilizadas dentro de la membrana
[8]	2022	Egipto	Procesos de oxidación avanzada (POA), coagulación química
[9]	2023	Malasia	Procesos de oxidación avanzada (POA)
[10]	2023	Reino Unido	Membrana de nanofiltración basada en COF
[11]	2022	No específica	Tecnologías híbridas
[12]	2022	Países bajos	Procesos de oxidación avanzada (POA)
[13]	2023	India	No específica
[14]	2022	No específica	Evaporadores convencionales y multiefectos
[15]	2023	India	No específica
[16]	2023	Polonia	Los hongos
[17]	2018	Egipto	El carbón activado (AC)
[18]	2023	India	Métodos electroquímicos

[19]	2020	Taiwán	Métodos convencionales
[20]	2021	Turquía	Electrocoagulación-electroflotación y filtración por membranas.
[21]	2021	Alemania	Carbón activado
[22]	2019	China	No específica
[23]	2024	España	Degradación electroquímica
[24]	2023	España	No específica
[25]	2023	Bélgica	Oxidación electroquímica y fotoelectroquímica
[26]	2023	No específica	Sistema bioelectroquímico
[27]	2023	China	No específica
[28]	2020	Alemania	Adsorción física usando carbón activado (CA) Oxidación mediante la ozonización Degradación
[29]	2023	Bélgica	Procesos de oxidación avanzados diferentes: (i) fotólisis (UV), (ii) electroquímico (eAOP) y (iii) fotoelectroquímico (eAOP/UV) irradiación UV
[30]	2023	Italia	No específica
[31]	2023	China	Fotocatálisis
[32]	2020	España	Adsorción, destilación y filtración
[33]	2020	España	Biodegradación, bioadsorción y/o bioacumulación
[34]	2021	Canadá	Carbón activado magnetizado
[35]	2023	India	Adsorción, ozonización, oxidación avanzadas, fotocátalisis y electrocátalisis Biorremediación
[36]	2023	Hungría	Bacterias, hongos o enzimas deshalogenadores Adsorción
[37]	2021	China	No específica
[38]	2018	China	Membrana biorreactor
[39]	2018	España	Nanofiltración
[40]	2019	EE. UU.	Osmosis inversa
[41]	2019	Dinamarca	Ozonización
[42]	2018	Sudáfrica	Lodos activados
[43]	2021	Alemania	No específica
[44]	2021	China	Sistema de biorreactores de membrana (MBR)
[45]	2022	Italia	Coagulación, sedimentación, procesos avanzados de oxidación, filtración y tecnologías de membrana
[46]	2023	Corea	Adsorbentes de óxidos metálicos calentados (HMOAs)
[47]	2023	India	Ósmosis inversa y evaporadores multi-efecto
[48]	2023	China	Ozonización y tratamiento ultravioleta
[49]	2023	Polonia	Uso de adsorbentes, chitosán y polímeros impresos molecularmente
[50]	2021	Brasil	Oxidación avanzada (AOP), fotocátalisis heterogénea

A. Contaminación en el agua

En la tabla III se muestra que residuos farmacéuticos se liberan de forma continua en el medio ambiente, a través de aguas residuales industriales, domésticas y hospitalarias para su eliminación en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Aquí podemos encontrar los productos farmacéuticos más encontrados son los antibióticos (amoxicilina, tetraciclina, entre otros), los analgésicos (ibuprofeno, paracetamol, diclofenaco, naproxeno entre otros) y los productos de cuidado de personal que se usan en la rutina diaria de las personas y otros en menor cantidad como antidepresivos, anticancerosos, estimulantes y de quimioterapia [3]

El que estos compuestos se encuentren en la mayoría de las aguas residuales se debe a que el consumo de estos fármacos va en aumento debido a que son recetados y consumidos en la mayoría del mundo y en algunos países se encuentran más o menos compuestos debido a la cantidad de personas o a la inadecuada gestión de eliminación de estos [3][15][17]

**TABLA III
COMPUESTOS FARMACÉUTICOS**

Residuos farmacéuticos		Autores
Compuestos	Nº	
Antibióticos	14	[2], [3], [4], [3] [4][5][6][8][9][12][14], [16][17], [18][19]
Antidepresivos	3	[3][8], [15]
Anticancerosos	1	[3]
Analgésicos	10	[5][6][10][11][12][13][15][17][19]
Quimioterapia	1	[5]
Estimulantes	2	[5][19]
Otros (productos de cuidado personal, pesticidas, etc.)	14	[2], [3], [4], [3], [4][5][6][8][9][12][14], [16][17], [18][19]

B. Métodos que existen para tratar el agua

En la tabla IV se muestra una clasificación de los métodos utilizados para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, categorizados en químicos, físicos y biológicos. Cada uno de estos métodos se desglosa en diversas técnicas específicas destinadas a abordar la presencia de diferentes tipos de fármacos, como antibióticos (Atb) y analgésicos (Aines). Entre los antibióticos, se destacan el sulfametoxazol (SMX) y el ciprofloxacino (CIP), mientras que dentro de los analgésicos se encuentran ibuprofeno (IBU), paracetamol (AS), diclofenaco (FCP), naproxeno (NPX).[39], [40], [38]

En el análisis de los resultados, se observa que la osmosis inversa emerge como la técnica más efectiva, mostrando un

alto porcentaje de eliminación para la mayoría de los fármacos seleccionados. Esta eficacia resalta la capacidad del osmosis inversa para abordar de manera exitosa la presencia de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales. [40]Por otro lado, la nanofiltración también se presenta como una técnica viable, aunque con porcentajes de eliminación ligeramente inferiores en comparación con la osmosis inversa.

Es fundamental destacar la relevancia de estos hallazgos en la búsqueda de estrategias efectivas para la gestión de aguas residuales contaminadas con fármacos. La elección y aplicación de estas técnicas deben considerarse cuidadosamente, teniendo en cuenta la naturaleza específica de los contaminantes y las condiciones ambientales locales. Asimismo, la constante investigación y evaluación de nuevas tecnologías son esenciales para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de tratamiento de aguas residuales farmacéuticas.

**TABLA IV
MÉTODOS Y ELIMINACIÓN DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS**

Método	Técnica	Compuesto	Fármaco	Tipo agua residual	Eliminación %	Autor
Químico	Ozonización	Atb	SMX	H	90	[41]
			CIP		-	-
Físico	Osmosis inversa	Atb	CIP	M	88.5	[40]
			SMX		95.9	[40]
			Aines		AS	59.4
		Aines	FCD		71.3	[40]
			IBU		79.3	[40]
			NPX		83	[40]
	Nanofiltración	Atb	CIP	M	99	[39]
			SMX		48	[39]
		Aines	AS		57.4	[10]
					FCD	38-85
			IBU		58-99	[39]
					NPX	48-88
Biológico	Lodo Activado	Atb	CIP	H	49.84	[42]
			SMX		H	-
		Aines	AS	H	88	[42]

Membrana biorreactor	Atb	FCD	M	98	[42]
		IBU		68-97	[42]
		NPX			
	Atb	CIP	M	70.1	[38]
		SMX		72	[38]
	Hormonas	E1	M	88.2	[38]
		E2		82	[38]
		E3		95	[38]

C. Métodos efectivos más usados para tratar el agua

En la siguiente Figura 2 se presentan los métodos más efectivos utilizados para la eliminación de residuos farmacéuticos, destacando su aplicación predominante en China. Durante los años 2021 y 2023, los métodos empleados incluyen la "Adsorción [18] física mediante carbón activado (CA)" y la "Oxidación mediante ozonización" [41]. Asimismo, se implementaron "Procesos de oxidación avanzados" que abarcan la fotólisis (UV), el electroquímico (eAOP) y el fotoelectroquímico (eAOP/UV), con irradiación UV. Estas estrategias representan las principales aproximaciones adoptadas para abordar la problemática de los residuos farmacéuticos en el país mencionado.

En el ámbito internacional, diversas naciones han desarrollado métodos y técnicas para abordar la presencia de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, adoptando enfoques específicos según sus capacidades y necesidades. Alemania destaca por su aplicación de adsorción física mediante carbón activado, oxidación mediante ozonización y degradación. Bélgica, por otro lado, emplea procesos de oxidación avanzados como fotólisis (UV), electroquímico (eAOP) y fotoelectroquímico (eAOP/UV) irradiación UV. Canadá se orienta hacia el uso de carbón activado magnetizado, sistema MBR, oxidación avanzada por radicales de sulfato fotoactivado (SR-AOP) y fotocatalisis. China, con una gama amplia, incluye adsorción física, ozonización, degradación, fotocatalisis, electroquímico, fotoelectroquímico, osmosis inversa, coagulación química, nanofiltración y biorremediación. Estados Unidos se destaca por su enfoque en osmosis inversa, mientras que España utiliza degradación electroquímica, nanofiltración, adsorción, destilación y filtración. India aborda la problemática mediante adsorción de carbón activado, oxidación avanzada, ozonización, cloración, nanofiltración, coagulación, fotocatalisis, electrocatalisis y biorremediación. Otros países como Malasia y Países Bajos se centran en procesos de oxidación avanzada (POA), el Reino Unido utiliza membranas de nanofiltración basadas en COF, Sudáfrica aplica Value Stream Map (VSM) y lodos activados, mientras que Turquía recurre a la

electrocoagulación-electroflotación y la filtración por membranas. Esta diversidad de enfoques refleja la complejidad del problema y la necesidad de estrategias adaptadas a las condiciones específicas de cada país.

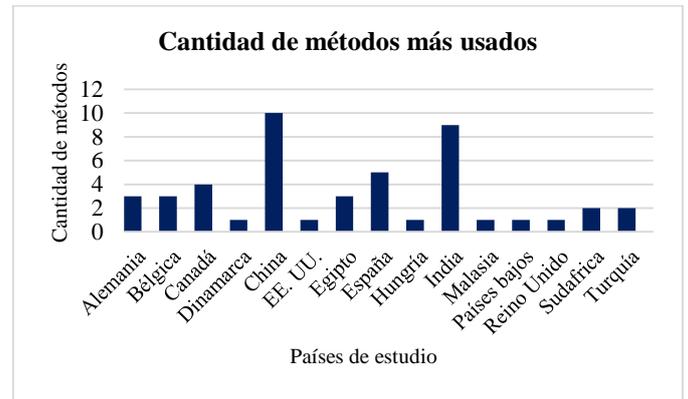


Fig. 2 Relación de métodos más usados por país

D. Estándares permitidos en aguas residuales

En esta sección, se evidencia que los parámetros desempeñan un papel crucial en la evaluación del estado del agua, la concentración de contaminantes y su conformidad con los límites permitidos. De acuerdo con [16], la combinación de un reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB) con un humedal construido (CW) logra una reducción eficiente de parámetros indicativos como la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno total, fósforo total y recuento de microorganismos (74%, 93%, 50%, 61% y 97%, respectivamente). Asimismo, [19] destaca que el tratamiento con evaporador multiefecto exhibe una mayor eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (TDS), DBO, DQO y nitrógeno total (TKN), con porcentajes de remoción del 85.57%, 85.90%, 93.19%, 81.32%, y 74.50%, en comparación con el tratamiento convencional. En relación con [13], el uso de óxido de calcio y alumbre, añadidos con óxido de calcio, resulta en una eficiencia de eliminación de DQO del 46.8% y 51%. Aunque algunos artículos no detallan estos estándares, indican que el nivel de efectividad alcanzado fue significativo.

Otra forma de evaluar la calidad del agua es estudiar los efectos de estos contaminantes farmacéuticos en organismos vivos, por ello según Ben C nos muestra la evaluación de toxicidad por medio del pez cebra en aguas residuales que contienen residuos farmacéuticos es un enfoque esencial para comprender los posibles efectos ambientales y para la salud asociados con la presencia de estos compuestos en los ecosistemas acuáticos. La creciente preocupación sobre la contaminación del agua por residuos farmacéuticos ha

llevado a una mayor atención hacia modelos biológicos como el pez cebra para evaluar los riesgos ambientales.[3]. Para esta evaluación el pez en su fase de embrión es expuesto a compuestos farmacéuticos, de ahí permanecen en observaciones para ver si sufren alguna malformación o alteración en su desarrollo y partir de eso poder encontrar alguna solución para reducir los posibles impactos. Antes de la experimentación, la mayoría de los estudios considera detalladamente la naturaleza específica de los residuos farmacéuticos, evaluando composición y estándares regulatorios. Esta fase pre-experimental, como se evidencia en las referencias citadas, abarca la identificación de los residuos y la determinación del porcentaje de eliminación previsto, proporcionando una base sólida para el diseño experimental y asegurando una evaluación completa de la efectividad de los métodos propuestos.

La exploración de métodos revela una destacada atención al enfoque químico, ejemplificado por el método de ozonización de Tank, que logró una impresionante tasa de eliminación del 90%, como se señala en la referencia [41]. Sin embargo, se destaca en la referencia [11] que este método presenta limitaciones significativas, como la generación de subproductos con potencial toxicidad superior a los compuestos originales, subrayando así la complejidad inherente a los procesos de eliminación de residuos farmacéuticos.

Otra vertiente explorada es el método físico, evidenciada por la investigación de García I. y Shad M, a través de la nanofiltración y la osmosis inversa respectivamente, destaca por sus impresionantes porcentajes de eliminación en los rangos del 85-90% y 59-89% [40].

Por otro lado, los métodos biológicos, ilustrados por los estudios de Kanama K. y Wang, muestran tasas de eliminación en el rango de 49-97% y 70-95%, respectivamente. Aunque estos métodos presentan ventajas económicas, como se expone en las referencias citadas, su principal desventaja radica en el tiempo requerido y las tasas de eliminación moderadas en comparación con algunos métodos químicos o físicos, subrayando la complejidad de la elección del enfoque de eliminación.

La revisión exhaustiva evidencia que, si bien los métodos físicos exhiben un porcentaje de eficacia superior, esto no implica que otros enfoques carezcan de eficiencia. La eficacia de un método particular, según se destaca en las referencias [11], [39], está sujeta a factores variables como la naturaleza de los contaminantes, las condiciones del agua y la escala de tratamiento aplicada. Otro punto que se tomó en cuenta de los autores es de donde se extrajeron las

muestras de estos residuos ya se de aguas hospitalario o municipales, afirmar que en uno hay más concentraciones que el otro no sería lo correcto ya que dependen de muchos factores como que en los hospitalarios hay medicamento, restos de laboratorio y los desechos de estos mientras que en los municipales medicamentos de uso doméstico, los vencidos sumado a que ahí se concentran diversas fuentes de aguas con residuos que pueden ser aún más contaminantes. [39], [40] Este reconocimiento subraya la necesidad de un enfoque holístico y contextualizado para abordar la eliminación de residuos farmacéuticos, adaptando las estrategias de tratamiento a las condiciones específicas de cada entorno.

Por parte de un estudio de Yi X. [6] mediante el SR-AOP foto activado sobre viviantita que es POA utiliza la radiación solar como fuente de energía para activar reacciones químicas para que se pueden degradar estos contaminantes farmacéuticos.

La información adicional proporcionada por Ghanz destaca la existencia de alternativas basadas en la naturaleza, como los humedales artificiales, y aboga por tecnologías híbridas que combinan métodos para lograr una eficacia mejorada en la eliminación, según se señala en la referencia [11].

Se han mostrado diversas técnicas en las que cada autor tuvo su nivel de eficiencia por lo que se puede resaltar que para implementar estos procesos se consideraron en algunos costos, que algunos residuos eran resistentes, pero muy pocos consideraron implementar programas de devolución de estos medicamentos o realizar investigaciones a largo plazo sobre la eficiencia o posibles alteraciones en las aguas por el uso de estas tecnologías. Esto resalta la importancia de adoptar enfoques integrados y holísticos para abordar eficazmente la compleja problemática de los residuos farmacéuticos en aguas residuales.

IV. DISCUSIÓN

En este análisis, se ha abordado la discusión en torno a los estudios procesados dentro del marco de la revisión sistemática de la literatura (RSL) sobre la erradicación de residuos farmacéuticos. La creciente preocupación a nivel mundial por los impactos ambientales derivados del aumento en el consumo de productos farmacéuticos ha impulsado la indagación de diversos métodos para abordar este desafío.

Los peligros potenciales para la salud pública, como nacimientos y decesos prematuros, bronquitis crónica, afecciones cardíacas, infecciones respiratorias, pérdida progresiva de la función pulmonar y cáncer, están vinculados

a la exposición a productos químicos presentes en el entorno, los cuales tienen efectos negativos graduales pero persistentes en la salud tanto humana como acuática.[15]

Además, el reuso del agua destinada a la agricultura puede tener efectos en la salud de la cadena alimentaria y en el suministro de agua si se llegan a consumir estos elementos, aun en niveles muy bajos de concentración.[42]

En la Fig. 2, se destaca que una parte significativa de los artículos revisados proviene de China, país reconocido por sus considerables inversiones en investigación y desarrollo, y se observan contribuciones relevantes de India y España.

La diversidad de métodos para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales que fueron implementados en estos países, según se señala en las referencias [2][9], [11], destaca la complejidad y amplitud de enfoques y prácticas empleados globalmente para enfrentar la problemática de los residuos farmacéuticos, enriqueciendo así la comprensión de este campo en constante evolución.

V. CONCLUSIÓN

Esta RSL revela la presencia y concentración de diversos fármacos en aguas residuales, con un énfasis particular en analgésicos y antibióticos. La detección de elevadas concentraciones de naproxeno, paracetamol e ibuprofeno en las aguas residuales municipales, junto con la presencia significativa de antibióticos como la norfloxacin y la ofloxacin en las aguas residuales hospitalarias, resalta la necesidad urgente de abordar este problema emergente. Además, entre los métodos evaluados, como los biológicos, químicos y físicos, este último presentó los porcentajes más altos de eliminación con la técnica de osmosis inversa con 90%. También se halló que la integración o combinación de métodos es ideal para tener una eliminación más eficiente de estos residuos y se debe tener en cuenta el costo y la calidad de los efluentes para que la aplicación de estos métodos sea viables y accesibles de acuerdo a la planta de tratamiento y el país donde se encuentre este.

VI. RECONOCIMIENTO

Agradecemos profundamente a la Universidad Tecnológica del Perú, sede Arequipa por elegir y por financiar esta investigación. Asimismo, agradecemos a los docentes Giancarlo Sanchez y Gerby Rondan por su orientación invaluable, a nuestra familia por el apoyo incondicional, a nuestros compañeros y am

VII. REFERENCIAS

- [1] N. Inarmal and B. Moodley, "Selected pharmaceutical analysis in a wastewater treatment plant during COVID-19 infection waves in South Africa," *Environ Sci (Camb)*, vol. 9, no. 6, pp. 1566–1576, Mar. 2023, doi: 10.1039/d3ew00059a.
- [2] K. Wang, T. Zhuang, Z. Su, M. Chi, and H. Wang, "Antibiotic residues in wastewaters from sewage treatment plants and pharmaceutical industries: Occurrence, removal and environmental impacts," *Science of the Total Environment*, vol. 788, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147811.
- [3] I. Ben Chabchoubi, S. S. Lam, S. E. Pane, M. Ksibi, G. Guerriero, and O. Hentati, "Hazard and health risk assessment of exposure to pharmaceutical active compounds via toxicological evaluation by zebrafish," *Environmental Pollution*, vol. 324. Elsevier Ltd, May 01, 2023. doi: 10.1016/j.envpol.2022.120698.
- [4] J. van Dijk, S. C. Dekker, S. A. E. Kools, and A. P. van Wezel, "European-wide spatial analysis of sewage treatment plants and the possible benefits to nature of advanced treatment to reduce pharmaceutical emissions," *Water Res*, vol. 241, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.120157.
- [5] R. Montes *et al.*, "Occurrence of persistent and mobile chemicals and other contaminants of emerging concern in Spanish and Portuguese wastewater treatment plants, transnational river basins and coastal water," *Science of the Total Environment*, vol. 885, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163737.
- [6] X. H. Yi *et al.*, "Effective elimination of tetracycline antibiotics via photoactivated SR-AOP over vivianite: A new application approach of phosphorus recovery product from WWTP," *Chemical Engineering Journal*, vol. 449, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.137784.
- [7] A. Zdarta and J. Zdarta, "Study of Membrane-Immobilized Oxidoreductases in Wastewater Treatment for Micropollutants Removal," *Int J Mol Sci*, vol. 23, no. 22, Nov. 2022, doi: 10.3390/ijms232214086.
- [8] I. Abdelfattah, M. E. Abuarab, E. Mostafa, M. H. El-Awady, K. M. Aboelghait, and A. M. El-Shamy, "Integrated system for recycling and treatment of

- hazardous pharmaceutical wastewater,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 4101–4110, Apr. 2023, doi: 10.1007/s13762-022-04269-7.
- [9] A. Husain Khan, H. Abdul Aziz, P. Palaniandy, M. Naushad, E. Cevik, and S. Zahmatkesh, “Pharmaceutical residues in the ecosystem: Antibiotic resistance, health impacts, and removal techniques,” *Chemosphere*, vol. 339, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139647.
- [10] K. Banjerdteerakul, H. Peng, and K. Li, “COF-based nanofiltration membrane for effective treatment of wastewater containing pharmaceutical residues,” *J Memb Sci*, vol. 681, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.memsci.2023.121780.
- [11] H. Ghazal *et al.*, “Insights into current physical, chemical and hybrid technologies used for the treatment of wastewater contaminated with pharmaceuticals,” *J Clean Prod*, vol. 361, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132079.
- [12] M. H. F. Graumans *et al.*, “Determination of cytotoxicity following oxidative treatment of pharmaceutical residues in wastewater,” *Chemosphere*, vol. 303, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135022.
- [13] O. Miarov, A. Tal, and D. Avisar, “A critical evaluation of comparative regulatory strategies for monitoring pharmaceuticals in recycled wastewater,” *J Environ Manage*, vol. 254, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109794.
- [14] R. Periyannan *et al.*, “Pharmaceutical Effluent Treatment Using Multi-effect Evaporator Process,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/5238033.
- [15] B. Chauhan, S. Dodamani, S. Malik, W. H. Almalki, S. Haque, and R. Z. Sayyed, “Microbial approaches for pharmaceutical wastewater recycling and management for sustainable development: A multicomponent approach,” *Environ Res*, vol. 237, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116983.
- [16] B. Kózka, A. Sośnicka, G. Nałęcz-Jawecki, A. Drobnińska, J. Turło, and J. Giebułtowicz, “Various species of Basidiomycota fungi reveal different abilities to degrade pharmaceuticals and also different pathways of degradation,” *Chemosphere*, vol. 338, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139481.
- [17] M. E. M. Ali, A. M. Abd El-Aty, M. I. Badawy, and R. K. Ali, “Removal of pharmaceutical pollutants from synthetic wastewater using chemically modified biomass of green alga *Scenedesmus obliquus*,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 151, pp. 144–152, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.01.012.
- [18] A. Mosur Nagarajan, A. Subramanian, K. Prasad Gobinathan, G. Mohanakrishna, and K. Sivagami, “Electrochemical-based approaches for the treatment of pharmaceuticals and personal care products in wastewater,” *J Environ Manage*, vol. 344, p. 118385, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118385.
- [19] C. W. Pai, D. Leong, C. Y. Chen, and G. S. Wang, “Occurrences of pharmaceuticals and personal care products in the drinking water of Taiwan and their removal in conventional water treatment processes,” *Chemosphere*, vol. 256, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127002.
- [20] C. Akarsu, H. Kumbur, and A. E. Kideys, “Removal of microplastics from wastewater through electrocoagulation-electroflotation and membrane filtration processes,” *Water Science and Technology*, vol. 84, no. 7, pp. 1648–1662, Oct. 2021, doi: 10.2166/wst.2021.356.
- [21] K. Hund-Rinke *et al.*, “Nanopharmaceuticals (Au-NPs) after use: Experiences with a complex higher tier test design simulating environmental fate and effect,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 227, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112949.
- [22] K. Lei *et al.*, “Spatial and seasonal variations of antibiotics in river waters in the Haihe River Catchment in China and ecotoxicological risk assessment,” *Environ Int*, vol. 130, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.envint.2019.104919.
- [23] S. Schröder, I. Ortiz, and M. F. San-Román, “Electrochemical degradation of key drugs to treat COVID-19: Experimental analysis of the toxic by-products formation (PCDD/Fs),” *Science of the Total Environment*, vol. 906, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167660.
- [24] S. Royano, A. de la Torre, I. Navarro, and M. Á. Martínez, “Pharmaceutically active compounds

- (PhACs) in surface water: Occurrence, trends and risk assessment in the Tagus River Basin (Spain),” *Science of the Total Environment*, vol. 905, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167422.
- [25] I. Ali, A. Barros de Souza, D. Cabooter, S. De Laet, K. Van Eyck, and R. Dewil, “Treatment of antimicrobial azole compounds via photolysis, electrochemical and photoelectrochemical oxidation: Degradation kinetics and transformation products,” *Environmental Pollution*, vol. 334, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.122220.
- [26] A. Mostafa *et al.*, “Bioelectrochemical system for enhancing anaerobic digestion of pharmaceutical-containing domestic wastewater,” *Chemosphere*, vol. 339, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139766.
- [27] N. Wang *et al.*, “Comprehensive overview of antibiotic distribution, risk and priority: A study of large-scale drinking water sources from the lower Yangtze River,” *J Environ Manage*, vol. 344, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118705.
- [28] B. Joseph, K. Kaetzl, F. Hensgen, B. Schäfer, and M. Wachendorf, “Sustainability assessment of activated carbon from residual biomass used for micropollutant removal at a full-scale wastewater treatment plant,” *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/ab8330.
- [29] A. Renau-Pruñonosa *et al.*, “Identification of aquifer recharge sources as the origin of emerging contaminants in intensive agricultural areas. La plana de Castellon, Spain,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, pp. 1–22, Mar. 2020, doi: 10.3390/w12030731.
- [30] L. Calgaro, E. Giubilato, L. Lamon, F. Calore, E. Semenzin, and A. Marcomini, “Emissions of pharmaceuticals and plant protection products to the lagoon of Venice: development of a new emission inventory,” *J Environ Manage*, vol. 330, p. 117153, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.117153.
- [31] D. Liao, J. Xu, and C. Liu, “Constructing MXene-derived Z-Scheme g-C₃N₄/Ti₃C₂TX/Ag₃PO₄ photocatalysts with enhanced charge transfer for aquatic organic pollutants removal,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 675, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.132050.
- [32] M. J. García-Galán *et al.*, “Fate of priority pharmaceuticals and their main metabolites and transformation products in microalgae-based wastewater treatment systems,” *J Hazard Mater*, vol. 390, May 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121771.
- [33] M. J. García-Galán *et al.*, “Fate of priority pharmaceuticals and their main metabolites and transformation products in microalgae-based wastewater treatment systems,” *J Hazard Mater*, vol. 390, May 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121771.
- [34] K. Khaledi, G. M. Valdes Labrada, J. Soltan, B. Predicala, and M. Nemati, “Adsorptive removal of tetracycline and lincomycin from contaminated water using magnetized activated carbon,” *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 5, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105998.
- [35] S. Das and S. Sengupta, “Sustainable Removal of Antibiotic Drugs from Wastewater Using Different Adsorbents—a Concise Review,” *Water Conservation Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s41101-023-00180-5.
- [36] H. T. Do Thi, D. Fozer, and A. J. Toth, “Extensive comparison of methods for removal of organic halogen compounds from pharmaceutical process wastewaters with life cycle, PESTLE, and multi-criteria decision analyses,” *J Environ Manage*, vol. 345, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118593.
- [37] J. Tan *et al.*, “Human exposure and health risk assessment of an increasingly used antibacterial alternative in personal care products: Chloroxyleneol,” *Science of the Total Environment*, vol. 786, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147524.
- [38] Y. Wang, X. Wang, M. Li, J. Dong, C. Sun, and G. Chen, “Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) from municipalwaste water with integrated membrane systems, MBR-RO/NF,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 15, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/ijerph15020269.
- [39] J. Garcia-Ivars, L. Martella, M. Massella, C. Carbonell-Alcaina, M. I. Alcaina-Miranda, and M. I. Iborra-Clar, “Nanofiltration as tertiary treatment method for removing trace pharmaceutically active compounds in wastewater from wastewater

- treatment plants,” *Water Res*, vol. 125, pp. 360–373, 2017, doi: 10.1016/j.watres.2017.08.070.
- [40] M. F. Shad, G. J. G. Juby, M. Sharbatmaleki, and S. Delagah, “Evaluating occurrence of contaminants of emerging concerns in MF/RO treatment of primary effluent for water reuse – Pilot study,” *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol. 9, no. 4, pp. 350–371, Dec. 2019, doi: 10.2166/wrd.2019.004.
- [41] K. Tang *et al.*, “Removal of pharmaceuticals, toxicity and natural fluorescence through the ozonation of biologically-treated hospital wastewater, with further polishing via a suspended biofilm,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 359, pp. 321–330, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.11.112.
- [42] K. M. Kanama, A. P. Daso, L. Mpenyana-Monyatsi, and M. A. A. Coetzee, “Assessment of pharmaceuticals, personal care products, and hormones in wastewater treatment plants receiving inflows from health facilities in North West Province, South Africa,” *J Toxicol*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/3751930.
- [43] D. Liao, J. Xu, and C. Liu, “Constructing MXene-derived Z-Scheme g-C₃N₄/Ti₃C₂TX/Ag₃PO₄ photocatalysts with enhanced charge transfer for aquatic organic pollutants removal,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 675, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.132050.
- [44] J. Zhou *et al.*, “Sustainable on-farm strategy for the disposal of antibiotic fermentation residue: Co-benefits for resource recovery and resistance mitigation,” *J Hazard Mater*, vol. 446, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130705.
- [45] F. Sannino *et al.*, “Removal of sulfanilamide by tailor-made magnetic metal-ceramic nanocomposite adsorbents,” *J Environ Manage*, vol. 310, May 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114701.
- [46] S. Lee, Y. Kim, P. J. Choi, and A. Jang, “Predicting the removal efficiency of pharmaceutical and personal care products using heated metal oxides as adsorbents based on their physicochemical characteristics,” *Chemosphere*, vol. 339, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139665.
- [47] A. Kotwani, A. Kapur, M. Chauhan, and S. Gandra, “Treatment and disposal practices of pharmaceutical effluent containing potential antibiotic residues in two states in India and perceptions of various stakeholders on contribution of pharmaceutical effluent to antimicrobial resistance: a qualitative study,” *J Pharm Policy Pract*, vol. 16, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1186/s40545-023-00562-z.
- [48] J. Liu *et al.*, “Occurrence and removal rate of typical pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in an urban wastewater treatment plant in Beijing, China,” *Chemosphere*, vol. 339, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139644.
- [49] M. Stachowiak, M. Cegłowski, and J. Kurczewska, “Hybrid chitosan/molecularly imprinted polymer hydrogel beads doped with iron for selective ibuprofen adsorption,” *Int J Biol Macromol*, vol. 251, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126356.
- [50] D. Maffessoni, I. C. Grazziotin, C. R. Klauck, T. Benvenuti, S. W. da Silva, and A. Meneguzzi, “Heterogeneous photocatalysis of moxifloxacin at a pilot solar compound parabolic collector: Elimination of the genotoxicity,” *J Environ Manage*, vol. 297, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113296.