

Impact of Reverse Osmosis on Water Treatment: A Systematic Literature Review 2019-2024

Saenz-Nolasco, Bryan Sebastian¹; Cruz-Aguilar, Ariana Alisabel² Osorio -Paredes, Liney, Mg.³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Chimbote, Perú, u20202727@utp.edu.pe, u20212692@utp.edu.pe, c22922@utp.edu.pe

Abstract– This systematic review analyzes the impact of reverse osmosis (RO) technology on treated water quality and its applicability in providing safe and sustainable drinking water between 2019 and 2024. The primary objectives were to assess the effectiveness of RO in removing contaminants from water, as well as its environmental impact and energy consumption. A comprehensive search was conducted in databases such as Scopus, using specific keywords and strict inclusion and exclusion criteria. The results indicate that RO is highly effective in removing a wide range of contaminants, including emerging micropollutants, heavy metals, and persistent organic compounds, significantly improving treated water quality. However, challenges were also identified, such as high energy consumption and waste generation, which require mitigation strategies. This review contributes significantly to the existing literature, highlighting both the advantages and limitations of RO. Future research exploring combinations of RO with other emerging technologies and their application in less developed contexts is recommended to improve the sustainability and effectiveness of water treatment systems.

Keywords– Reverse osmosis, water treatment, industries, desalination, systematic review.

Impacto de la osmosis inversa en el tratamiento del agua: Una revisión sistemática de literatura 2019-2024

Saenz-Nolasco, Bryan Sebastian¹; Cruz-Aguilar, Ariana Alisabel² Osorio -Paredes, Liney, Mg.³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Chimbote, Perú, u20202727@utp.edu.pe, u20212692@utp.edu.pe, c22922@utp.edu.pe

Resumen– Este trabajo de revisión sistemática analiza el impacto de la tecnología de ósmosis inversa (OI) en la calidad del agua tratada y su aplicabilidad en la provisión de agua potable segura y sostenible entre 2019 y 2024. Los objetivos principales fueron evaluar la eficacia de la OI en la eliminación de contaminantes del agua, así como su impacto ambiental y consumo energético. Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos como Scopus, utilizando palabras clave específicas y criterios de inclusión y exclusión estrictos. Los resultados indican que la OI es altamente efectiva para eliminar una amplia gama de contaminantes, incluidos micropoluentes emergentes, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, mejorando significativamente la calidad del agua tratada. Sin embargo, también se identificaron desafíos, como el alto consumo energético y la generación de residuos, que requieren estrategias de mitigación. La contribución de esta revisión a la literatura existente es significativa, destacando tanto las ventajas como las limitaciones de la OI. Se recomiendan futuras investigaciones que exploren combinaciones de OI con otras tecnologías emergentes y su aplicación en contextos menos desarrollados para mejorar la sostenibilidad y eficacia de los sistemas de tratamiento de agua.

Palabras clave-- Osmosis inversa, tratamiento de agua, industrias, desalinización, revisión sistemática.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los problemas relacionados con el agua dulce se han convertido en un tema muy controvertido a nivel mundial [1], ya que en los océanos el 97% son recursos hídricos, es decir aguas que deben tratarse para su uso mientras que solo el 3% es agua dulce y se enfrenta a muchos problemas de escasez, para su proceso uno de los métodos más empleados en la actualidad es la osmosis inversa (OI) [2],[3],[4].

Se estima para el 2050, casi seis millones de personas sufrirán de escasez de agua limpia [5],[6]. Según las proyecciones, para 2050, el consumo doméstico de agua aumentará un 130% y la industria manufacturera crecerá un 400%, lo que provocará un aumento del 55% en la demanda de agua [7], creando una constante preocupación por el uso correcto del agua y una intensificada búsqueda para crear nuevas formas o métodos sostenibles de obtener agua dulce sin dañar ni perturbar el medio ambiente [8].

La desalinización se percibe así, como una solución viable y factible para abordar este problema [9], este método consiste en que el agua de alimentación se separa en dos corrientes, la corriente de producto (agua dulce) y la corriente de

subproducto (salmuera) [10]. En este contexto, nace la necesidad de brindar información sobre el estado del arte existente en las fechas de estudio, sobre las variables en cuestión. Por otro lado, este estudio se justifica socialmente porque brinda información actual los beneficios y pro sobre el uso del método de la osmosis inversa para abordar el problema que viene afectando al planeta buscando sintetizar la importancia de la desalinización del agua.

El estudio confirma que el sistema de ósmosis inversa purifica eficazmente el agua de pozo para uso humano y demuestra el potencial para reutilizar las aguas residuales tratadas. Además, 2.397.000 galones de aguas residuales tratadas se reutilizaron para torres de refrigeración y calderas, lo que conservó los recursos de agua dulce y evitó la descarga de un volumen equivalente de aguas residuales en el sistema de alcantarillado.

El tratamiento del agua mediante el uso de la osmosis inversa se ha vuelto popular debido a la mejora de la tecnología de membranas y los beneficios como altas tasas de recuperación y bajo consumo de energía [11],[12].

Sin embargo, no todo es bueno puesto que trae consigo cosas perjudiciales como el gran volumen de salmuera de desalinización producida puede suponer un impacto ambiental adverso cuando se vierte directamente al mar [13],[14].

Otros problemas importantes son el alto consumo energético de las tecnologías de desalinización y tratamiento de salmuera, así como la contaminación del aire debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos [15]. Se prevé que la descarga de salmuera tenga un impacto adverso en el ecosistema del mar [16].

En este sentido es importante resaltar que este proceso que ha traído beneficios con la purificación del agua también ha generado residuos sólidos [17]. Para mitigar los impactos ambientales de la eliminación de membranas, en los últimos años se ha desarrollado un enfoque de reciclaje de membranas al final de su vida útil utilizando la técnica de pirólisis, es así, que este método de descomposición térmica se obtiene una reducción sustancial del volumen de residuos y para minimizar el impacto es necesario tratar de gestionar de manera efectiva los residuos sólidos y así poder aprovechar al máximo los

recursos que nos deja el proceso de la osmosis inversa y así convertir estos residuos en una fuente adicional de recursos hasta su reemplazo [18]. Pasado ese período, en los países en

desarrollo las membranas generalmente se desechan en los vertederos como fuente secundaria de contaminación.

Por tanto, se propone la siguiente cuestión general de investigación: ¿Cuál es el efecto de la tecnología de osmosis inversa en la calidad del agua tratada y su aplicabilidad en la provisión de agua potable segura y sostenible?

Aplicando el enfoque PICOC (Población, intervención, comparación, resultados y contexto) se realizaron 2 preguntas específicas: ¿Cuáles son los principales contaminantes que pueden ser eliminados mediante la tecnología de osmosis inversa, y cómo se compara su eficacia con otros métodos de tratamiento de agua?; ¿Cuál es el impacto ambiental de la osmosis inversa en términos de consumo de energía, generación de residuos y huella de carbono, y cuáles son las estrategias para minimizar estos efectos negativos?.

Los objetivos específicos son: Estudiar la literatura científica existente, evaluar los principales contaminantes del agua, el impacto ambiental de la osmosis inversa y el consumo energético.

II. METODOLOGÍA

El estudio desarrollado es una revisión sistemática de la literatura (RSL) donde se plantea realizar la síntesis y un resumen estructurado de manera que demos respuesta a nuestra cuestión de investigación sobre el impacto de la osmosis inversa en el tratamiento de aguas. El realizar una RSL nos brinda muchos beneficios ya que nos ayuda a identificar vacíos de conocimiento en los documentos analizados y brindar opiniones críticas sobre el estado del arte identificado en las investigaciones realizadas de modo que respondamos las cuestiones de investigación y demos alcance a la comunidad científica [19].

Para el desarrollo de este estudio utilizamos la guía de la DECLARACIÓN PRISMA 2020, la cual nos da alcances para la correcta estructuración de artículos de revisión sistemática y metaanálisis, para poder realizar estudios desde su concepción, hasta la publicación en revistas de alto impacto [20],[21]. En los últimos años, PRISMA ha alcanzado importantes resultados al usarse mucho alrededor del mundo, donde han tenido resultados exitosos en la contribución de nuevo conocimiento.

La primera fase de búsqueda se denomina “identificación de estudios”, donde a través de una búsqueda sistemática que realizamos en la base de Scopus, perteneciente a la editorial holandesa Elsevier, entramos fuentes relacionadas a nuestro tema. Para la búsqueda utilizamos palabras clave como: “reverse osmosis”, “water treatment” y “environment”, con las cuales con apoyo de los operadores booleanos (AND) realizamos la siguiente ecuación inicial de búsqueda: "reverse osmosis" AND "water treatment" AND environment. Para el proceso de cribado hicimos uso de criterios de elegibilidad poder garantizar la calidad de los estudios incluidos en la revisión. Cabe resaltar, que no todos los criterios de exclusión generaron una sustracción de estudios, por lo que al realizar el flujograma PRISMA no todos los criterios aparecen con un

número de artículos excluidos, el detalle de los criterios se observa en la tabla 1.

TABLA I
CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD

Criterios de Inclusión	
CI1	Los estudios deben contener una o más variables de la investigación.
CI2	Los estudios deben presentar una o más dimensiones de la osmosis inversa
CI3	Los estudios deben abarcar el área temática de ciencias ambientales, ingeniería, ciencias sociales y química.
CI4	Los estudios deben poseer al menos 1 de las siguientes palabras clave de búsqueda: Osmosis inversa, tratamiento de agua, filtración y eliminación de contaminantes.
Criterios de Exclusión	
EC1	Estudios que estén fuera del rango (2019-2024)
EC2	Estudios que sean diferentes a la categoría “Article”
EC3	Estudios que no estén en el proceso final de publicación.
EC4	Estudios que estén escritos en idiomas diferentes al inglés.
EC5	Los estudios que no tienen relación con las siguientes palabras clave: education, metaverse, augmented reality.
EC6	Los estudios no se encuentran en la etapa final de publicación.

La búsqueda completa se detalla en el siguiente flujograma de PRISMA, el cual se ve en la fig. 1.

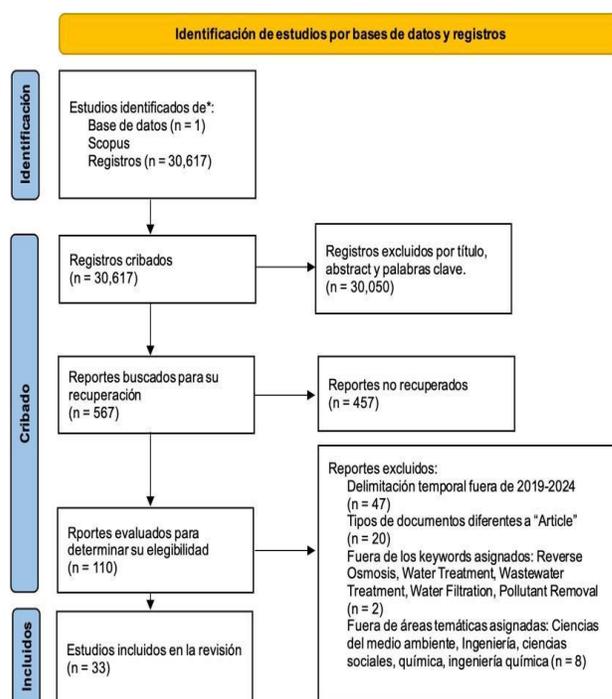


Fig. 1. Diagrama de flujo de PRISMA para la identificación de registros.

Durante la fase final del cribado nos quedaron 33 artículos potenciales incluidos ya que cumplen con los criterios de elegibilidad y cumplen con el tema estudiado. En la fase de resultados se evaluará indicadores bibliométricos para cuantificar la literatura encontrada en gráficos y luego se

realizará un estudio de contenido para extraer los resultados de los estudios en una matriz.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados Bibliométricos

TABLA II
RESUMEN – DATA OVERVIEW

Autores	Título de estudios
Ahmed et al. (2021) [24]	Household water filtration technology to ensure safe drinking water supply in the Langat river basin, Malaysia
Akinwekomi et al. (2020) [25]	Beneficiation of acid mine drainage (AMD): A viable option for the synthesis of goethite, hematite, magnetite, and gypsum – Gearing towards a circular economy concept
Al-Aboosi & El-Halwagi (2019) [26]	A stochastic optimization approach to the design of shale gas/oilwastewater treatment systems with multiple energy sources under uncertainty
Al-Ghamdi et al. (2019) [27]	Membrane backwash cleaning using CO2 nucleation
Cadore et al. (2020) [28]	Bibliometric approach to the perspectives and challenges of membrane separation processes to remove emerging contaminants from water
Carrera et al. (2019) [29]	Dioxanes and dioxolanes in source waters: Occurrence, odor thresholds and behavior through upgraded conventional and advanced processes in a drinking water treatment plant
Coccia & Bontempi (2023) [30]	New trajectories of technologies for the removal of pollutants and emerging contaminants in the environment
Cui et al. (2023) [31]	Reverse Osmosis coupling Multi-Catalytic Ozonation (RO-MCO) in treating printing and dyeing wastewater and membrane concentrate: Removal performance and mechanism
Dalbosco et al. (2023) [32]	Removal of fluoxetine from water by nanofiltration and reverse osmosis; [Remoção de fluoxetina de água por nanofiltração e osmose inversa]

Echevarría et al. (2020) [33]	Hybrid sorption and pressure-driven membrane technologies for organic micropollutants removal in advanced water reclamation: A techno-economic assessment
Gani et al. (2023) [34]	A case study of comparative techno-economic and life cycle assessment of tap water versus household reverse osmosis-based drinking water systems in a North Indian city
Grote et al. (2022) [35]	Inputs of disinfection by-products to the marine environment from various industrial activities: Comparison to natural production
Hacıfazlıoğlu et al. (2019) [36]	Concentrate reduction in NF and RO desalination systems by membrane-in-series configurations-evaluation of product water for reuse in irrigation
Herkert et al. (2020) [37]	Assessing the effectiveness of point-of-use residential drinking water filters for perfluoroalkyl substances (pfass)
Jamil et al. (2019) [38]	Simultaneous removal of natural organic matter and micro-organic pollutants from reverse osmosis concentrate using granular activated carbon
Jarma et al. (2021) [39]	Assessment of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for simultaneous removal of arsenic and boron from spent geothermal water
Kwofie et al. (2021) [40]	Removal of cyanide and other nitrogen-based compounds from gold mine effluents using moving Bed Biofilm reactor (MBBR)
Mao et al. (2021) [41]	Numerical simulations of calcium sulphate scaling in full-scale brackish water reverse osmosis pressure vessels using computational fluid dynamics
McCleaf et al. (2023) [42]	Drinking water nanofiltration with concentrate foam fractionation—A novel approach for removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)
Melián (2020) [43]	Sustainable waste water treatment systems (2018-2019)

Nazligul et al. (2022) [44]	Selection of Desalination System for Commercial Vessels by Implementing Improved Intuitionistic Fuzzy TOPSIS Method
Radcliffe (2022) [45]	Current status of recycled water for agricultural irrigation in Australia, potential opportunities and areas of emerging concern
Radovenchyk et al. (2023) [46]	Removal of Iron Compounds from Mechanical Filters of Household Reverse Osmosis Systems Water Purification
Sapkota et al. (2020) [47]	High permeability sub-nanometre sieve composite MoS ₂ membranes
Scholes et al. (2020) [48]	Transformation of Trace Organic Contaminants from Reverse Osmosis Concentrate by Open-Water Unit-Process Wetlands with and without Ozone Pretreatment
Taloba (2022) [49]	An Artificial Neural Network Mechanism for Optimizing the Water Treatment Process and Desalination Process
Tavares et al. (2022) [50]	Study for Recycling Water Treatment Membranes and Components towards a Circular Economy—Case of Macaronesia Area
Tran et al. (2020) [51]	Decentralised, small-scale coagulation-membrane treatment of wastewater from metal recycling villages – A case study from Vietnam
Tsompanoglou et al. (2023) [52]	Evaluating the Operation of a Full-Scale Sequencing Batch Reactor–Reverse Osmosis–Evaporation System Used to Treat Landfill Leachates: Removal of Pollutants, Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions
Wang et al. (2022) [53]	Robust ultrathin nanoporous MOF membrane with intra-crystalline defects for fast water transport
Yu et al. (2021) [54]	Enhanced transpiration by attached microalgae-simulated plants for zero-discharge of reverse osmosis concentrated water (Wroc)
Zakmout et al. (2020) [55]	Tannery effluent treatment by nanofiltration, reverse osmosis and chitosan modified membranes

Zhai et al. (2022) [56]	One-Step Reverse Osmosis Based on Riverbank Filtration for Future Drinking Water Purification
-------------------------	---

La distribución de las keywords a lo largo de los estudios analizados con respecto al tema propuesto se muestra en la Fig.

2. En ese marco, se presentan 2 gráficos de superposición de redes, el primero analiza la distribución por años de publicación, donde se pudo detectar 17 clusters, donde las palabras claves más empleadas en estudios de periodos recientes (2019-2024) son: “Osmosis Inversa”, “desalación”, “Tratamiento de Agua”, “nanofiltración”, “agua potable”, “reutilización del agua”, “consumo de energía” y “tratamiento biológico de agua”. Al mismo tiempo, cuando se realizó el análisis por media de citaciones en el tiempo, la tendencia actual apunta hacia la osmosis inversa como un tema central en la investigación sobre el tratamiento del agua. Este enfoque se combina con técnicas avanzadas como la desalación y la reutilización del agua, conformando un campo de estudio robusto y en constante evolución. Diversos investigadores están desarrollando estudios sobre aspectos clave como el tratamiento biológico del agua, el consumo de energía y la eficiencia de los sistemas. Otros términos importantes identificados son: “reciclaje”, “calidad de agua”, “descarga de efluentes”, “contaminantes emergentes”, “lavado inverso”, lo que sugiere la importancia de enfrentar nuevos desafíos en la purificación del agua y mantener la eficiencia de los sistemas de filtración.

TABLA III
PROMEDIO DE CITACIONES POR AÑO

Year	MeanTCperArt	N	MeanTCperYear	Citable Years
2019	31,40	5	5,23	6
2020	36,11	9	7,22	5
2021	11,80	5	2,95	4
2022	25,71	7	8,57	3
2023	5,57	7	2,79	2

Nota: Datos obtenidos por elaboración propia. “Promedio de citaciones por año”

La tabla III muestra la media total de citaciones por artículo y por año, la cual cubre un período de 5 años. En el 2020 se encontró una producción científica destacada con 9 estudios indexados en Scopus, destacando con 36,11 en el MeanTCperArt, sin embargo, al momento de normalizar el indicador, el año con mayor MeanTCperYear lo tiene el 2022, donde se indexaron 7 documentos relacionados con la osmosis inversa. El que las publicaciones teniendo alta tasa de publicación sugiere que el tema aún es de interés en la comunidad científica. La osmosis inversa y su impacto en la mejora de la calidad del agua es un tema de desarrollo sostenible que busca impactar hasta el 2030. Los estudios más impactantes fueron publicados en 2019, 2020 y 2022.

Fig. 2 Diagrama de líneas de investigaciones con respecto a su año de publicación

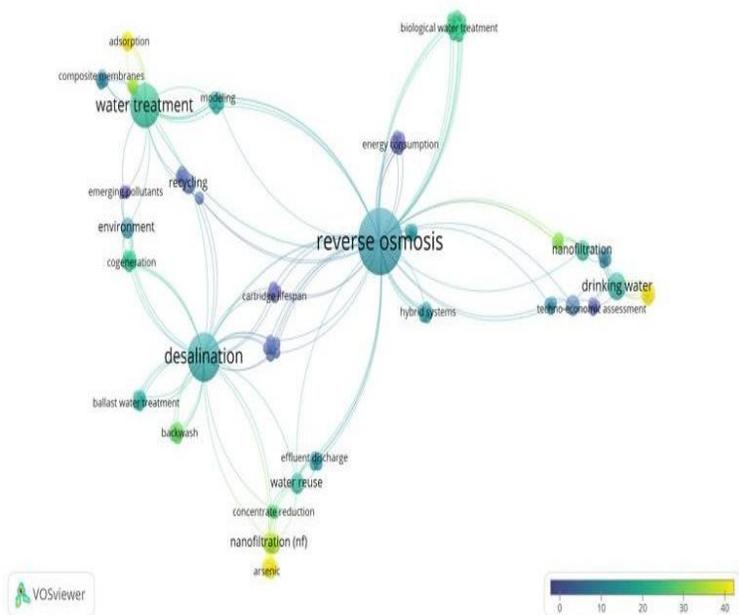


TABLE IV
DOCUMENTOS MÁS CITADOS A NIVEL GLOBAL

Investigación	DOI	TC	TCperYear	Normalized TC
Sapkota B, 2020, Nat Commun	10.1038/s41467-020-16577-y	121	24.20	3.59
Wang X, 2022, Nat Commun	10.1038/s41467-021-27873-6	85	28.33	3.74
Jamil S, 2019, Water Res	10.1016/j.watres.2019.02.016	59	9.83	1.90
Herkert Nj, 2020, Environ Sci Techno Lett	10.1021/acs.estlett.0c00004	56	11.20	1.66
Akinwekomi V, 2020, Minerals Eng	10.1016/j.mineng.2020.106204	43	8.60	1.28
Jarma Ya, 2021, J Hazard Mater	10.1016/j.jhazmat.2020.124129	39	9.75	3.61
Zakmout A, 2020, Membr	10.3390/membranes10120378	30	6.00	0.89
Taloba Ai, 2022, Alexandria Engineering Journal	10.1016/j.aej.2022.03.029	29	9.67	1.28
Al-Ghamdi Ma, 2019, Water Res	10.1016/j.watres.2019.114985	28	4.67	0.90

Hacifazlioglu Mc, 2019, Desalination	10.1016/j.desal.2019.05.011	25	4.17	0.81
--------------------------------------	-----------------------------	----	------	------

La tabla IV hace referencia a un indicador que muestra los 10 documentos con mayor impacto en base a la cantidad total de citas más altas. En ese sentido, el estudio de Sapkota (2020), tiene una cantidad total de citas de 121 siendo seguido por Wang (2022) con 85 citas acumuladas, ambos estudios hacen énfasis en la importancia del tratamiento de las aguas a través de procesos de la osmosis inversa, donde resaltan que el apuntar a estas técnicas, es buscar un objetivo en común, la sostenibilidad del recurso hídrico para mayor acceso alrededor del mundo, ambos estudios están publicados en Nature Communications, una revista de alto impacto la cual el Scimago Journal & Country Rank (SJR) le tiene asignado un índice H de 522, posicionándola en cuartil 1 (Q1), lo que demuestra el impacto que tiene en la comunidad científica por parte de la gran difusión de esta revista internacional.

TABLE V
FUENTES MÁS RELEVANTES CONSULTADAS

Fuentes	Frecuencia	%
Water Research	5	15%
Membranes	3	9%
Water (Switzerland)	3	9%
Nature Communications	2	6%
Sustainability (Switzerland)	2	6%
Water Science And Technology	2	6%
Alexandria Engineering Journal	1	3%
Desalination	1	3%
Ecological Engineering And Environmental Technology	1	3%
Energies	1	3%
Engineering	1	3%
Environmental Research	1	3%
Environmental Science And Technology	1	3%
Environmental Science And Technology Letters	1	3%
Journal Of Cleaner Production	1	3%
Journal Of Hazardous Materials	1	3%
Journal Of Water Sanitation And Hygiene For Development	1	3%
Mathematical Problems In Engineering	1	3%
Minerals Engineering	1	3%
Revista Ambiente E Agua	1	3%
Science Of The Total Environment	1	3%
Water Resources And Industry	1	3%

La siguiente tabla identifica las fuentes más relevantes consultadas en esta investigación. Aunque se consultaron un total de 20 fuentes indexadas, la revista Water Research presenta la mayor frecuencia de artículos publicados en torno al tema estudiado, con un 15% del total. Water Research es una revista de alto impacto en el campo del tratamiento de agua, conocida por su rigurosidad científica y contribuciones significativas en la investigación de tecnologías avanzadas de tratamiento de agua. La revista Membranes también destaca con un 9% de frecuencia. Membranes es reconocida por sus estudios innovadores en tecnologías de membranas,

incluyendo ósmosis inversa, y su impacto en la eliminación de contaminantes del agua. Su alta frecuencia en esta revisión refleja su relevancia en la investigación actual sobre tratamiento de agua mediante membranas. Otras revistas relevantes incluyen Water (Switzerland) y Nature Communications, cada una con un 6% de frecuencia. Water (Switzerland), publicada por MDPI, es conocida por su enfoque multidisciplinario en temas relacionados con el agua, mientras que Nature Communications es una revista de acceso abierto que publica investigaciones de alta calidad en diversas disciplinas, incluida la ciencia del agua. Revistas como Sustainability (Switzerland) y Water Science and Technology también aparecen con un 6% de frecuencia. Sustainability (Switzerland) aborda aspectos sostenibles del tratamiento de agua, y Water Science and Technology se centra en tecnologías avanzadas de tratamiento y su aplicación práctica. Otras fuentes consultadas, como Desalination, Environmental Research, y Journal of Hazardous Materials, cada una con un 3% de frecuencia, proporcionan una visión complementaria y

especializada en diferentes aspectos del tratamiento de agua y la gestión de contaminantes.

3.1 RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

La tabla VI propone responder cuestiones de investigación a través de una síntesis de contenido en base a una identificación de cada sector donde se ha evaluado el tratamiento de aguas residuales. Los contaminantes por metales pesados en el sector minero.

Una de sus aplicaciones según la tabla V, va dirigido al tratamiento de agua reciclada para riego agrícola en Australia, que reduce la dependencia del agua fresca. A medida que se profundiza en las oportunidades y preocupaciones emergentes, se evalúa cómo mejorar la eficiencia, retener los minerales del agua de riego, la sostenibilidad del uso de OI en la agricultura mediante el uso combinado de tecnologías [45].

TABLA VI
ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE OPERACIONES, HERRAMIENTAS UTILIZADAS, INDICADORES EVALUADOS Y MEJORAS DETECTADAS

Pregunta General					
¿Cuál es el efecto de la tecnología de osmosis inversa en la calidad del agua tratada y su aplicabilidad en la provisión de agua potable segura y sostenible?					
1.Sector Minero	Arsénico	Boro	Metales pesados	Compuestos Nitrogenados	
1.1. Contaminantes	[39]	[39]	[25][39]	[40]	
1.2. Tecnologías	MBBR	Nanofiltración	Osmosis inversa		
	[40]	[39]	[25]		
1.3. Mejoras Calidad del agua	Eliminación de contaminantes del agua geotérmica		Reducción en los efluentes de las minas de oro		
	[39][25]		[40]		
2.Sector Farmacéutico	Fluoxetina				
2.1. Contaminantes	[32]				
2.2. Tecnologías	Nanofiltración		Osmosis inversa		
	[32]		[32]		
2.3. Mejoras Calidad del agua	Eliminación de fluoxetina				
	[32]				
3.Sector Ambiental	Contaminantes Emergentes	Agua concentrada de OI	Productos de Desinfección	Micropoluentes	
3.1. Contaminantes	[28][30][33][42][48]	[54]	[35]	[33][48]	
3.2. Tecnologías	Ozonización	Osmosis Inversa	Planta simulada Microalga	Sorción Híbrida	Separación de Membrana
	[48]	[36][33][48]	[54]	[33]	[28][36][33][42][48]
3.3. Mejoras Calidad del agua	Eliminación de contaminantes emergentes	Agua cero contaminantes	Reducción de productos de desinfección del agua		
	[28][29][33][42][48]	[54]	[35][48]		
4.Sector Industrial	Contaminantes textiles		Efluentes de curtiembre	Compuestos de hierro	
4.1. Contaminantes	[31]		[55]	[46]	
	RO-MCO	Nanofiltración	Osmosis inversa		

4.2. Tecnologías	[31]	[55]	[31][55][46]	
4.3. Mejoras Calidad del agua	Eliminación de contaminantes industriales		Reducción de contaminantes efluentes	
	[31][55]		[46]	
5.Sector Agrícola	Agua reciclada		Contaminantes en agua de riego	
5.1. Contaminantes	[45]		[45]	
5.2. Tecnologías	Sistema de agua Reciclada			
	[45]			
5.3. Mejoras Calidad del agua	Reducción de dependencia de fuentes de agua fresca			
	[45]			
6.Sector Municipal-Doméstico	Minerales y sustancias químicas	Micropoluentes y materia orgánica	Lixiviados y contaminantes de vertederos	Sustancias perfluoroalquiladas
6.1. Contaminantes	[41][34]	[38][33][24]	[52]	[37][42]
6.2. Tecnologías	Osmosis inversa		Membranas de filtración	
	[24][34][37][38][41][50][52][56]		[34][38][41][50][52][56]	
6.3. Mejoras Calidad del agua	Eliminación de PFAS y micropoluentes orgánicos		Reducción de materia orgánica natural y sulfato de calcio	
	[37][38][42]		[38][41]	

Este estudio de revisión ha examinado diversos enfoques y metodologías en la aplicación de la tecnología de ósmosis inversa (OI) para evaluar su impacto en la calidad del agua tratada y su aplicabilidad en la provisión de agua potable segura y sostenible a través de una variedad de contextos y tecnologías. Los principales hallazgos revelan que la OI es altamente efectiva en la eliminación de una amplia gama de contaminantes, incluidos micropoluentes emergentes, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, mejorando significativamente la calidad del agua tratada.

La implementación de la OI en diversas aplicaciones, como se demostró en el estudio de Mao et al. (2021), ha permitido la optimización de los procesos de tratamiento de agua, evidenciando cómo la tecnología puede facilitar una gestión operativa más eficiente y sostenible [41]. De manera similar, la combinación de OI con otros tratamientos avanzados, como la fraccionación de espuma del concentrado, ha mostrado mejoras significativas en la eliminación de contaminantes emergentes como los PFAS [42]. Estos hallazgos subrayan la importancia de las técnicas operativas avanzadas bien implementadas.

Comparando estos resultados con otras investigaciones, se observa una consistencia en la alta eficiencia de la OI. Por ejemplo, un estudio destaca el potencial de las membranas basadas en grafeno para mejorar aún más la eficiencia de la OI [28]. Sin embargo, otra investigación señala que los sistemas domésticos de OI, aunque efectivos, pueden ser menos sostenibles debido a su alto costo y la eliminación de minerales esenciales del agua, lo que sugiere la necesidad de un enfoque equilibrado y contextualizado para la implementación de esta tecnología [34].

Un hallazgo inesperado de la revisión fue la variabilidad en el impacto de la OI en diferentes condiciones operativas y geográficas. Por ejemplo, el estudio de Zhai et al. (2022) sobre la filtración en un solo paso basada en ribera sugiere que la combinación de pretratamientos naturales con OI puede ofrecer soluciones de bajo costo y alto rendimiento en ciertas regiones, aunque estos resultados pueden no ser directamente aplicables en todas las áreas debido a las diferencias en la calidad del agua fuente y las infraestructuras disponibles [56]. Además, otro estudio muestra que, aunque la OI es efectiva para el tratamiento de lixiviados de vertederos, la evaporación por recompresión de vapor utilizada en combinación con la OI contribuye significativamente al consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero [52].

En el caso de la Industria minera, se recomienda el uso de membranas de ósmosis inversa para tratar aguas geotérmicas con alta concentración de arsénico y boro sugiriendo indagar en el diseño y la optimización de membranas de nanofiltración, por su menor demanda energética [39]. También Hacıfazlıoğlu et al. (2021), nos dicen que las tecnologías de nanofiltración y osmosis inversa en configuraciones en serie puede ofrecer una solución eficiente y rendimiento energético viable para desalinizar el agua, haciendo que ésta sea adecuada para la reutilización en el riego agrícola. Pero esta investigación podría tener aplicaciones importantes en áreas donde el agua potable es escasa y el riego es fundamental para la agricultura. [36].

Mientras que otros autores concluyen que el uso de un reactor de lecho móvil con biofilm (MBBR) es una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales de minas de oro, para la eliminación de cianuro y compuestos nitrogenados, con implicaciones significativas para mejorar la

sostenibilidad ambiental en la minería [40]. Para este caso se podría decir que la OI puede ser utilizada como una tecnología adicional, especialmente en casos en los que se requiere una eliminación avanzada de contaminantes después de un tratamiento primario como el que proporciona el MBBR. Esto podría ser útil para desalinizar el agua o eliminar sales y metales disueltos que pueden estar presentes tras el tratamiento biológico.

Las limitaciones de este estudio, como el alto consumo energético y la generación de residuos salinos, resulta necesario profundizar en las estrategias específicas que se han propuesto para mitigar estos problemas, así como en su aplicabilidad según distintos contextos.

Entre las estrategias más relevantes destaca el uso de dispositivos de recuperación de energía (como intercambiadores de presión), que permiten reutilizar parte de la energía hidráulica de la salmuera, reduciendo significativamente el consumo total del sistema. Su implementación es altamente viable en plantas de mediana y gran escala, donde el retorno de inversión es claro. Asimismo, el aprovechamiento de energías renovables (solar, eólica) se presenta como una alternativa prometedora, sobre todo en regiones con buen potencial energético natural, aunque su viabilidad depende de la capacidad local para gestionar la intermitencia energética y los costos de inversión inicial.

Otras estrategias incluyen la optimización del pretratamiento del agua para minimizar el fouling y, con ello, la presión de operación, así como el desarrollo de membranas de alta eficiencia que requieren menor presión para lograr la misma tasa de permeación. Aunque estas últimas aún presentan barreras económicas y tecnológicas, representan una línea de desarrollo clave.

La viabilidad de cada estrategia depende del contexto: en zonas rurales o de bajos recursos, deben priorizarse soluciones de bajo costo y mantenimiento sencillo, como mejoras operativas o sistemas compactos autónomos. En cambio, en regiones con infraestructura avanzada, puede apostarse por sistemas híbridos, automatización y energías limpias. Integrar estas estrategias permite avanzar hacia una operación más sostenible, eficiente y adaptable de la OI en distintos escenarios.

Para futuras investigaciones, sería provechoso explorar cómo la OI puede ser adaptada y aplicada en contextos menos desarrollados y en sistemas de tratamiento de agua domésticos. Además, estudios longitudinales que examinen los efectos a largo plazo de la implementación de OI en diferentes contextos y escalas podrían proporcionar insights más profundos sobre su viabilidad y sostenibilidad. También sería valioso investigar combinaciones de OI con otras tecnologías emergentes, como la ozonización multicatalítica, así como el desarrollo de nuevas membranas más eficientes y sostenibles, incluyendo aquellas modificadas con quitosano, grafeno u otros nanomateriales, que permitan mejorar la permeabilidad, reducir el fouling y optimizar el rendimiento general de los sistemas de tratamiento de agua [31], [55].

IV. CONCLUSIONES

Se realizó una revisión sistemática de literatura que tuvo Esta investigación ha logrado identificar el impacto significativo de la tecnología de ósmosis inversa (OI) en la calidad del agua tratada y su aplicabilidad en la provisión de agua potable segura y sostenible. Nuestros hallazgos destacan que la OI es altamente efectiva en la eliminación de una amplia gama de contaminantes, incluidos micropoluentes emergentes, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, logrando mejorar significativamente la calidad del agua tratada. En particular, se demostró que la OI puede alcanzar tasas de eliminación de hasta el 99.9% para diversos compuestos, y su combinación con tecnologías avanzadas como la fraccionación de espuma ha demostrado ser especialmente eficaz para la eliminación de sustancias perfluoroalquiladas (PFAS). Se destaca también el uso del grafeno y nanomateriales para crear membranas de ósmosis inversa para mejorar el rendimiento de retención de contaminantes químicos y disminuir costos operativos. Así mismo existe la propuesta de un sistema innovador que combina la ósmosis inversa con tratamiento biológico que busca mejorar la recuperación de agua a partir del concentrado residual generado en procesos de OI a través de la simulación de plantas y la utilización de microalgas adheridas, cuyo fin es evitar la descarga de agua concentrada y lograr una recuperación máxima de agua (cero descarga) con altos niveles de eficiencia.

La investigación también ha evidenciado que, aunque la OI es una tecnología energéticamente intensiva, las innovaciones recientes han mejorado su eficiencia energética y la optimización de costos, contribuyendo así a la sostenibilidad y rentabilidad del proceso. No obstante, el costo asociado y la eliminación de minerales esenciales en sistemas domésticos presentan desafíos que deben ser abordados para asegurar una implementación equilibrada y efectiva de esta tecnología.

Esta revisión aporta un análisis detallado y actualizado sobre las ventajas y limitaciones de la OI, proporcionando un marco de referencia importante para futuras investigaciones en el campo del tratamiento de agua. La contribución de esta investigación a la literatura existente es significativa, destacando la necesidad de un enfoque contextualizado y específico para maximizar los beneficios de la OI y minimizar sus limitaciones. Reconocemos ciertas limitaciones en nuestro estudio, tales como la concentración en estudios realizados en contextos tecnológicamente avanzados y bien financiados, lo cual podría no reflejar completamente el impacto de la OI en economías emergentes o regiones con infraestructuras menos desarrolladas. Además, la mayoría de los estudios revisados se centraron en aplicaciones industriales y a gran escala, lo que podría no ser representativo de aplicaciones domésticas o de pequeña escala. Para futuras investigaciones, se recomienda

explorar cómo la OI puede ser adaptada y aplicada en contextos menos desarrollados y en sistemas de tratamiento de agua domésticos. Sería beneficioso llevar a cabo estudios longitudinales para examinar los efectos a largo plazo de la implementación de OI en diferentes contextos y escalas. También se sugiere investigar combinaciones de OI con otras tecnologías emergentes, como la ozonización multicatalítica y las membranas modificadas con quitosano, para mejorar aún más la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de tratamiento de agua.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial al coordinador de investigación de la Universidad Tecnológica del Perú Mg. Luis Julio Chauca y a todo nuestro equipo que colaboró en la realización de esta investigación con aras de la mejora continua.

REFERENCIAS

- [1] H. Kariman, A. Shafieian, y M. Khiadani, «Small scale desalination technologies: A comprehensive review», *Desalination*, vol. 567, p. 116985, dic. 2023, doi: 10.1016/j.desal.2023.116985.
- [2] N. Ghosh, «Water-Scarce Economies and Scarcity Values: Can Water Futures Trading Combat Water Scarcity?», *Occasional Paper*, n.o 342, pp. 1-38, 2022.
- [3] M. Kashif, M. A. Sabri, N. Zhang, y F. Banat, «Graphene: A diamond hammer for cracking hard nuts in reverse osmosis desalination membranes», *Desalination*, vol. 581, p. 117552, jul. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117552.
- [4] E. J. Okampo y N. Nwulu, «Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110712, abr. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110712.
- [5] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. en Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. UN, 2016. doi: 10.18356/e9ff6a85-es.
- [6] A. S. Richey et al., «Quantifying renewable groundwater stress with GRACE», *Water Resources Research*, vol. 51, n.o 7, pp. 5217-5238, 2015, doi: 10.1002/2015WR017349.
- [7] E. M., «ONU advierte de escasez de agua potable para 2050», *AP News*. Accedido: 28 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://apnews.com/article/9f3d3dbd8cef41a4a5c003263e978eff>
- [8] M. Nasrollahi, A. Motevali, A. Banakar, y M. Montazeri, «Comparison of the cumulative exergy demand of phase change and reverse osmosis desalination plants with environmental impacts approach», *Desalination*, vol. 572, p. 117156, mar. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2023.117156.
- [9] A. Panagopoulos, K.-J. Haralambous, y M. Loizidou, «Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review», *Science of The Total Environment*, vol. 693, p. 133545, nov. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.351.
- [10] G. L. Ghurye, D. Mishra, y L. Lucas, «Thermal Desalination of Produced Water—An Analysis of the Partitioning of Constituents into Product Streams and Its Implications for Beneficial Use Outside the O&G Industry», *Water*, vol. 13, n.o 8, Art. n.o 8, ene. 2021, doi: 10.3390/w13081068.
- [11] A. Maftouh, O. El Fatni, S. Bouzekri, F. Rajabi, M. Sillanpää, y M. H. Butt, «Economic feasibility of solar-powered reverse osmosis water desalination: a comparative systemic review», *Environ Sci Pollut Res*, vol. 30, n.o 2, pp. 2341-2354, ene. 2023, doi: 10.1007/s11356-022-24116-z.
- [12] A. Cala, A. Maturana-Córdoba, y J. Soto-Verjel, «Exploring the pretreatments' influence on pressure reverse osmosis: PRISMA review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, p. 113866, dic. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113866.
- [13] W. H. Tu, Y. Zhao, W. P. Chan, y G. Lisak, «Reclaimed seawater discharge – Desalination brine treatment and resource recovery system», *Water Research*, vol. 251, p. 121096, mar. 2024, doi: 10.1016/j.watres.2023.121096.
- [14] A. Panagopoulos y K.-J. Haralambous, «Environmental impacts of desalination and brine treatment - Challenges and mitigation measures», *Marine Pollution Bulletin*, vol. 161, p. 111773, dic. 2020, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111773.
- [15] S. Lee, J. Choi, Y.-G. Park, H. Shon, C. H. Ahn, y S.-H. Kim, «Hybrid desalination processes for beneficial use of reverse osmosis brine: Current status and future prospects», *Desalination*, vol. 454, pp. 104- 111, mar. 2019, doi: 10.1016/j.desal.2018.02.002.
- [16] D. B. Riffel y P. C. M. Carvalho, «Small-scale photovoltaic-powered reverse osmosis plant without batteries: Design and simulation», *Desalination*, vol. 247, n.o 1, pp. 378-389, oct. 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.07.019.
- [17] V. S. S. Katakam y V. Bahadur, «Reverse osmosis-based water treatment for green hydrogen production», *Desalination*, vol. 581, p. 117588, jul. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117588.
- [18] C. P. M. de Oliveira et al., «Converting recycled membranes into photocatalytic membranes using greener TiO₂-GRAPHENE oxide nanomaterials», *Chemosphere*, vol. 306, p. 135591, nov. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135591.
- [19] J. Suvo-Vega, A. da Costa, y A. Inês, «Revisión sistemática sobre aprendizaje autónomo universitario a través de la virtualidad», *Cuadernos de desarrollo aplicados a las TIC*, vol. 10, n.o 2, pp. 17-47, 2021.
- [20] G. S. Miñan-Olivos, J. A. Estrada-Espinoza, A. A. Cruz-Aguilar, J. A. Moreno-Ramos, y C. B. Cisneros-Hilario, «Business intelligence as a competitive advantage in organizations: A systematic review of the literature between 2012-2022.», en *Proceedings of the 21th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): "Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development"*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023. doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.758.
- [21] M. J. Page et al., «Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas», *Rev Esp Cardiol*, vol. 74, n.o 9, pp. 790-799, sep. 2021, doi: 10.1016/j.recsep.2021.06.016.
- [22] O. Bellido-Valdiviezo et al., «Digital Citizenship: A bibliographic Review of the Publications in Scopus from 2017 to 2022», en *Proceedings of the 21th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): "Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development"*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023. doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.975.
- [23] E. Linares et al., «Metodología de una revisión sistemática», *Actas Urol Esp*, vol. 42, n.o 8, pp. 499-506, oct. 2018, doi: 10.1016/j.acuro.2018.01.010.
- [24] M. F. Ahmed, M. B. Mokhtar, y N. A. Majid, «Household water filtration technology to ensure safe drinking water supply in the Langat river basin, Malaysia», *Water*, vol. 13, n.o 8, 2021, doi: 10.3390/w13081032.
- [25] V. Akinwekomi et al., «Beneficiation of acid mine drainage (AMD): A viable option for the synthesis of goethite, hematite, magnetite, and gypsum – Gearing towards a circular economy concept», *Minerals Eng*, vol. 148, 2020, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106204.
- [26] F. Y. Al-Aboosi y M. M. El-Halwagi, «A stochastic optimization approach to the design of shale gas/oilwastewater treatment systems with multiple energy sources under uncertainty», *Sustainability*, vol. 11, n.o 18, 2019, doi: 10.3390/su11184865.
- [27] M. A. Al-Ghamdi, A. Alhadidi, y N. Ghaffour, «Membrane backwash cleaning using CO₂ nucleation», *Water Res.*, vol. 165, 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.114985.
- [28] J. S. Cadore, L. F. Fabro, T. G. Maraschin, N. R. de Souza Basso, M. J. R. Pires, y V. B. Brião, «Bibliometric approach to the perspectives and challenges of membrane separation processes to remove emerging

- contaminants from water», *Water Sci. Technol.*, vol. 82, n.o 9, pp. 1721-1741, 2020, doi: 10.2166/wst.2020.450.
- [29] G. Carrera, L. Vegué, F. Ventura, A. Hernández-Valencia, R. Devesa, y M. R. Boleda, «Dioxanes and dioxolanes in source waters: Occurrence, odor thresholds and behavior through upgraded conventional and advanced processes in a drinking water treatment plant», *Water Res.*, vol. 156, pp. 404-413, 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.03.026.
- [30] M. Coccia y E. Bontempi, «New trajectories of technologies for the removal of pollutants and emerging contaminants in the environment», *Environ. Res.*, vol. 229, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.115938.
- [31] T. Cui, X. Wang, Y. Chen, Y. Chen, B. Fu, y Y. Tu, «Reverse Osmosis coupling Multi-Catalytic Ozonation (RO-MCO) in treating printing and dyeing wastewater and membrane concentrate: Removal performance and mechanism», *Water Resour. Ind.*, vol. 30, 2023, doi: 10.1016/j.wri.2023.100217.
- [32] T. Dalbosco et al., «Removal of fluoxetine from water by nanofiltration and reverse osmosis», *Rev. Ambiente Agua*, vol. 18, 2023, doi: 10.4136/ambi-agua.2885.
- [33] C. Echevarría et al., «Hybrid sorption and pressure-driven membrane technologies for organic micropollutants removal in advanced water reclamation: A techno-economic assessment», *J. Clean. Prod.*, vol. 273, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123108.
- [34] K. M. Gani, S. R. Rather, A. Chandra, y M. Arshid, «A case study of comparative techno-economic and life cycle assessment of tap water versus household reverse osmosis-based drinking water systems in a North Indian city», *J. Water Sanit. Hyg. Develop.*, vol. 13, n.o 8, pp. 595-603, 2023, doi: 10.2166/WASHDEV.2023.081.
- [35] M. Grote et al., «Inputs of disinfection by-products to the marine environment from various industrial activities: Comparison to natural production», *Water Res.*, vol. 217, 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118383.
- [36] M. C. Hacifazlıoğlu, H. R. Tomasini, L. Bertin, T. Ö. Pek, y N. Kabay, «Concentrate reduction in NF and RO desalination systems by membrane-in-series configurations-evaluation of product water for reuse in irrigation», *Desalination*, vol. 466, pp. 89-96, 2019, doi: 10.1016/j.desal.2019.05.011.
- [37] N. J. Herkert et al., «Assessing the effectiveness of point-of-use residential drinking water filters for perfluoroalkyl substances (pfass)», *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 7, n.o 3, pp. 178-184, 2020, doi: 10.1021/acs.estlett.0c00004.
- [38] S. Jamil, P. Loganathan, A. Listowski, J. Kandasamy, C. Khoushed, y S. Vigneswaran, «Simultaneous removal of natural organic matter and micro-organic pollutants from reverse osmosis concentrate using granular activated carbon», *Water Res.*, vol. 155, pp. 106-114, 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.02.016.
- [39] Y. A. Jarma et al., «Assessment of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for simultaneous removal of arsenic and boron from spent geothermal water», *J. Hazard. Mater.*, vol. 405, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124129.
- [40] I. A. Kwofie, H. Jogand, M. De Ladurantaye-Noël, y C. Dale, «Removal of cyanide and other nitrogen-based compounds from gold mine effluents using moving Bed Biofilm reactor (MBBR)», *Water*, vol. 13, n.o 23, 2021, doi: 10.3390/w13233370.
- [41] W. Mao et al., «Numerical simulations of calcium sulphate scaling in full-scale brackish water reverse osmosis pressure vessels using computational fluid dynamics», *Membr.*, vol. 11, n.o 7, 2021, doi: 10.3390/membranes11070521.
- [42] P. McCleaf, W. Stefansson, y L. Ahrens, «Drinking water nanofiltration with concentrate foam fractionation—A novel approach for removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)», *Water Res.*, vol. 232, 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.119688.
- [43] J. A. H. Melián, «Sustainable waste water treatment systems (2018-2019)», *Sustainability*, vol. 12, n.o 5, 2020, doi: 10.3390/su12051940.
- [44] Y. E. Nazligul, D. Yazir, y B. Sahin, «Selection of Desalination System for Commercial Vessels by Implementing Improved Intuitionistic Fuzzy TOPSIS Method», *Math. Probl. Eng.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/5739682.
- [45] J. C. Radcliffe, «Current status of recycled water for agricultural irrigation in Australia, potential opportunities and areas of emerging concern», *Sci. Total Environ.*, vol. 807, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151676.
- [46] I. Radovenchyk, O. Ivanenko, M. K. Victorivna, y V. Radovenchyk, «Removal of Iron Compounds from Mechanical Filters of Household Reverse Osmosis Systems Water Purification», *Ecol. Eng. Environ. Tech.*, vol. 24, n.o 6, pp. 163-172, 2023, doi: 10.12912/27197050/168097.
- [47] B. Sapkota, W. Liang, A. VahidMohammadi, R. Karnik, A. Noy, y M. Wanunu, «High permeability sub-nanometre sieve composite MoS2 membranes», *Nat. Commun.*, vol. 11, n.o 1, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16577-y.
- [48] R. C. Scholes, J. F. King, W. A. Mitch, y D. L. Sedlak, «Transformation of Trace Organic Contaminants from Reverse Osmosis Concentrate by Open-Water Unit-Process Wetlands with and without Ozone Pretreatment», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, n.o 24, pp. 16176-16185, 2020, doi: 10.1021/acs.est.0c04406.
- [49] A. I. Taloba, «An Artificial Neural Network Mechanism for Optimizing the Water Treatment Process and Desalination Process», *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, n.o 12, pp. 9287-9295, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.03.029.
- [50] T. Tavares, F. Leon, J. Vaswani, B. Peñate, y A. Ramos-Martín, «Study for Recycling Water Treatment Membranes and Components towards a Circular Economy—Case of Macaronesia Area», *Membr.*, vol. 12, n.o 10, 2022, doi: 10.3390/membranes12100970.
- [51] L. T. Tran, A. T. Do, T. H. Pham, K. T. Nguyen, y H. C. Duong, «Decentralised, small-scale coagulation-membrane treatment of wastewater from metal recycling villages – A case study from Vietnam», *Water Sci. Technol.*, vol. 82, n.o 10, pp. 2125-2133, 2020, doi: 10.2166/wst.2020.493.
- [52] K. Tsompanoglou, O. P. Koutsou, y A. S. Stasinakis, «Evaluating the Operation of a Full-Scale Sequencing Batch Reactor–Reverse Osmosis–Evaporation System Used to Treat Landfill Leachates: Removal of Pollutants, Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions», *Energies*, vol. 16, n.o 19, 2023, doi: 10.3390/en16196872.
- [53] X. Wang et al., «Robust ultrathin nanoporous MOF membrane with intracrystalline defects for fast water transport», *Nat. Commun.*, vol. 13, n.o 1, 2022, doi: 10.1038/s41467-021-27873-6.
- [54] H. Yu, Y. Yang, T. Yang, Q. Shi, y L.-L. Zhuang, «Enhanced transpiration by attached microalgae-simulated plants for zero-discharge of reverse osmosis concentrated water (Wroc)», *Water*, vol. 13, n.o 15, 2021, doi: 10.3390/w13152058.
- [55] A. Zakmout, F. Sadi, C. A. M. Portugal, J. G. Crespo, y S. Velizarov, «Tannery effluent treatment by nanofiltration, reverse osmosis and chitosan modified membranes», *Membr.*, vol. 10, n.o 12, pp. 1-20, 2020, doi: 10.3390/membranes10120378.
- [56] Y. Zhai, G. Liu, y W. G. J. van der Meer, «One-Step Reverse Osmosis Based on Riverbank Filtration for Future Drinking Water Purification», *Engineering*, vol. 9, pp. 27-34, 2022, doi: 10.1016/j.eng.2021.02.015.