

Systematic Review on Water Pollution and Wastewater Treatment in the Asian Textile Industry

León-Velarde, César Gerardo ¹ Matos Samar, Alejandra Milagros ² Oscco Platero, Antony Fredy ³ Puma Pérez, Cristina Isabel ⁴ Salazar Deza, Carmen Angélica ⁵ Fernández-Flores, Silvia Milagros ⁶
^{1,2,3,4} Universidad Nacional Federico Villarreal, Peru, cleon@unfv.edu.pe, 2025030034@unfv.edu.pe, 2025009153@unfv.edu.pe, 2023025213@unfv.edu.pe

⁵Universidad Tecnológica del Peru, Peru, c17059@utp.edu.pe

⁶Universidad de San Martín de Porres, Peru, sfernandez@usmpvirtual.edu.pe

Abstract– *The textile industry is one of the world's most polluting, especially in Asia, where wastewater discharge contributes to water pollution. Therefore, various methods for treating textile wastewater exist. The objective of this review is to identify these different wastewater treatment methods and analyze which are the most effective and environmentally friendly in removing pollutants to minimize water pollution. The PICO method was used with keywords to formulate the research question, followed by a Boolean search using Boolean operators (AND, OR) to link English terms in the Scopus database, resulting in 1479 articles. The PRISMA method was then used to select 46 articles that met inclusion and exclusion criteria, such as open access research and publication year. The results include an evaluation of different authors and their publications, along with a graphical analysis generated by VOSviewer showing the most prominent keywords. This study also reveals that certain conventional methods, such as coagulation, are effective. However, advanced methods for treating textile wastewater, such as electrocoagulation and the use of nanotechnology in the design of these new methods, are promising, although they are more expensive and have limitations.*

Keywords-- *Water pollution, removal of contaminants, textile industry, textile wastewater treatment.*

Revisión Sistemática sobre la Contaminación Hídrica y el Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Textil Asiática

León-Velarde, César Gerardo ¹ Matos Samar, Alejandra Milagros ² Oscco Platero, Antony Fredy ³ Puma Pérez, Cristina Isabel ⁴ Salazar Deza, Carmen Angélica ⁵ Fernández-Flores, Silvia Milagros ⁶
^{1,2,3,4} Universidad Nacional Federico Villarreal, Peru, cleon@unfv.edu.pe, 2025030034@unfv.edu.pe, 2025009153@unfv.edu.pe, 2023025213@unfv.edu.pe

⁵Universidad Tecnológica del Peru, Peru, c17059@utp.edu.pe

⁶Universidad de San Martín de Porres, Peru, sfernandez@usmpvirtual.edu.pe

Resumen– La industria textil es una de las más contaminantes del mundo, especialmente en Asia, en donde la descarga de aguas residuales contribuye a la contaminación hídrica, es por ello que se tienen diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales textiles. El objetivo de esta revisión es identificar los diferentes métodos de tratamientos de aguas residuales y analizar cuáles pueden ser más efectivos y ecológicos respecto a la eliminación de contaminantes para minimizar la contaminación hídrica. Se hizo uso del método PICO con palabras clave para obtener la pregunta de investigación y una búsqueda booleana usando conectores booleanos (AND, OR) para vincular términos en inglés en la base de datos Scopus, resultando 1479 artículos; luego se empleó el método PRISMA en donde se seleccionaron 46 artículos por cumplir los criterios de inclusión y exclusión tales como investigaciones con el acceso abierto y delimitación del año. Se tienen como resultados la evaluación de distintos autores y sus publicaciones, junto al análisis gráfico generado por VOSviewer en donde se muestran las palabras clave que más resaltaron. En este estudio también se aprecia que ciertos métodos convencionales como la coagulación resultan eficaces; sin embargo, los métodos avanzados para el tratamiento de aguas residuales textiles como la electrocoagulación y la utilización de nanotecnología en el diseño de estos nuevos métodos son prometedores, aunque estos son más costosos y poseen limitaciones.

Palabras clave– Contaminación hídrica, eliminación de contaminantes, industria textil, tratamiento de aguas residuales textiles.

I. INTRODUCCIÓN

En estos últimos años la industria textil ha experimentado un crecimiento significativo a nivel mundial, pero con ello también ha crecido la contaminación que esta genera, convirtiéndose en una de las industrias más contaminantes del mundo según ONU Programa para el Medio Ambiente [1]. Esta industria es responsable de hasta el 8% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, pero lo más preocupante es la cantidad de agua que consume, siendo usados aproximadamente 215 billones de litros al año [2].

Además, se sabe que los continentes más afectados por la industria textil es el africano, ya que aquí se elabora parte de la producción de cientos de marcas para minimizar costos, generando una gran cantidad de residuos textiles [3]; y el

asiático porque según la Organización Internacional del Trabajo (OIT) Asia es considerada como la “fábrica de ropa del mundo” ya que representa el 55% de las exportaciones mundiales textiles y prendas de vestir [4]. Para esta revisión nos centraremos en el continente asiático, ya que al ser el centro de fabricación del mundo genera una gran contaminación y especialmente hídrica, es por ello que va de la mano del tratamiento de aguas residuales para minimizar este impacto.

Dicho antes la industria textil es un sector que contribuye en un 20% a la contaminación hídrica a nivel mundial [5], ya que se consume y se descarga grandes cantidades de agua, teniendo un estudio que indica que más de 50 lugares en el mundo descargan aguas residuales de la industria textil [6]. Además, se sabe que al año se fabrican 60 mil millones de kilogramos de telas los cuales liberan una gran cantidad de aguas residuales, y al día por cada kilo de tela procesada se utiliza aproximadamente 200 litros de agua [6,7]. Estas grandes descargas de aguas residuales contienen metales pesados como el cadmio (Cd), plomo (Pb), níquel (Ni), zinc (Zn), Cromo (Cr) y cobre (Cu) [8]; tensioactivos; sulfatos; cloruros; y colorantes tóxicos como el rojo Congo (CR), azul metileno, rodamina B y violeta de cristal (CV) [9]; entre estos se suman alrededor de 72 compuestos tóxicos, como el ion nitrato (NO_3^-) o el ion nitrito (NO_2^-) de los cuales 30 no se eliminan con la aplicación de métodos tradicionales en el tratamiento de aguas residuales [10]. También se sabe que al año se liberan 4 millones quinientas mil toneladas de estos colorantes y otros contaminantes relacionados, evidenciando que la descarga de aguas residuales es un problema ambiental [11].

Enfocándonos en el continente asiático especialmente en países en desarrollo como Malasia, India, Bangladesh y Pakistán; se tiene que en Malasia a pesar de que la industria textil contribuya significativamente a su crecimiento económico, los efluentes textiles representan el 22% del total de sus aguas residuales demostrando un impacto negativo [12]; asimismo se tiene a la India que ocupa el segundo lugar en el mundo en la producción de textiles y tejidos [13], es por ello que existen plantas de tratamiento de aguas residuales, sin

embargo estos enfrentan desafíos porque ciertos contaminantes del agua como el sulfato de sodio (Na_2SO_4) y el cloruro de sodio (NaCl) se acumulan generando incrustaciones y corrosiones dentro de la infraestructura de la planta [14]; también se tiene a Bangladesh que representa el 6,8% del mercado mundial de exportación de productos textiles, es así que ocupa el segundo lugar a nivel mundial como exportador de prendas de vestir prefabricadas [15,16], lo cual explica que genere grandes cantidades de aguas residuales, sin embargo estas se tratan pero con químicos altamente peligrosos como el ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), soda cáustica (NaOH), y agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), hipoclorito de sodio (NaClO), entre otros [17] y por último se tiene a Pakistán en donde la industria textil contribuye con más del 60% de exportaciones del país y representa el 9% del producto nacional bruto (PNB), además se posiciona como el octavo mayor exportador de productos textiles en Asia [18,19].

Por otro lado, se sabe que existen diversos métodos para el tratamiento de aguas residuales por lo que es válido preguntarnos ¿Qué tecnologías de tratamiento de aguas residuales han demostrado mayor eficacia en la reducción de la contaminación hídrica generada por la industria textil en los países asiáticos, en comparación con los métodos convencionales?

Las aguas residuales generadas por la industria textil contienen una alta concentración de contaminantes, siendo los más dañinos los metales pesados y los colorantes textiles porque son cancerígenos, mutagénicos y genotóxicos para todas las formas de vida [20, 21]. Asimismo se presentan a diversos seres vivos que son afectados por los colorantes como el ser humano que puede presentar problemas de salud entre ellos la dermatitis, tifoidea, irritación de la piel, y demás enfermedades al entrar en contacto directo con el agua contaminada; también tenemos a la vida acuática ya que este contaminante dificulta la penetración de la luz solar en el agua, lo cual debilita a los fenómenos fotosintéticos de las plantas y ocasiona alteraciones en el ecosistema acuático, generando un impacto al medio ambiente [21, 22, 23].

Debido a los efectos adversos causados en seres humanos, vida acuática y medio ambiente por los contaminantes se proponen distintos métodos para el tratamiento de aguas residuales que los eliminan, como la coagulación; la adsorción; la tecnología de membranas pudiendo ser estas poliméricas o cerámicas, siendo esta la más utilizada debido a su simplicidad de diseño y mayores flujos [24, 25]; entre otros. El método de tratamiento de adsorción ha llamado la atención debido a que presenta una alta eficiencia, ayuda a conservar el medio ambiente, hace uso de lo natural, es fácil de operar, y es rentable [26, 27]; también se tiene a los sistemas humedales construidos (CWS) como una alternativa en bajo costo que presenta procesos naturales en donde se involucra suelos, microorganismos y plantas para eliminar estos contaminantes, aunque su aplicación es limitada en países como Pakistán [28]; de igual manera también se presenta el tratamiento biológico de aguas residuales en condiciones

anaeróbicas, estas además de presentar costos reducidos son ecológicamente amigables ya que reduce el consumo de productos químicos y utiliza recursos como la energía [29].

Entonces el objetivo de esta revisión es identificar los diferentes métodos de tratamientos de aguas residuales y analizar cuáles pueden ser más efectivos y ecológicos respecto a la eliminación de contaminantes para minimizar la contaminación hídrica.

II. METODOLOGÍA

Se usó el método PICO (Problema, Intervención, Comparación y Outcome/Resultado) presentado en la tabla I, para formular la pregunta de investigación, ¿Qué tecnologías de tratamiento de aguas residuales han demostrado mayor eficacia en la reducción de la contaminación hídrica generada por la industria textil en los países asiáticos, en comparación con los métodos convencionales?

TABLA I
ELABORACIÓN DEL MÉTODO PICO

Criterio	Elemento aplicado al tema	Pregunta orientadora
P	La industria textil en países de Asia genera aguas residuales lo cual causa contaminación del agua.	¿Qué métodos de tratamiento de aguas residuales textiles son más efectivos para reducir la contaminación del agua en Asia?
I	Implementación de métodos de tratamiento de aguas residuales ya sean físicos, químicos o biológicos.	¿Qué tecnologías de tratamiento se aplican para reducir la contaminación hídrica causada por la industria textil asiática?
C	Métodos tradicionales y avanzados para el tratamiento de aguas residuales	¿Los métodos avanzados son más eficaces que los métodos convencionales para la eliminación de contaminantes?
O	Reducción de la contaminación del agua y mejora en la calidad de efluentes.	¿Qué resultados ambientales se obtienen tras la aplicación de tecnologías de tratamiento en la industria textil asiática?

Durante la etapa de identificación no se encontraron artículos duplicados ya que solo se utilizó la base de datos Scopus, en donde se realizó una búsqueda booleana usándose operadores y conectores booleanos (AND, OR) para conectar términos en inglés, formando como ecuación de búsqueda: ("water pollution in asia" OR "water contamination in asia" OR "wastewater" OR "effluent" OR "industrial discharge") AND ("textile industry in asia" OR "textile wastewater" OR "textile effluent" OR "dyeing industry" OR "fabric industry in

asia") AND ("heavy metals" OR "pollutant removal" OR "toxic compounds" OR "sustainability"). Como resultado se identificaron un total de 1479 artículos en Scopus.

Luego tomaremos en cuenta los criterios de inclusión mostrados en la tabla II en donde se han considerado solo investigaciones que cuenten con acceso abierto, además de información sobre la contaminación hídrica que genera la industria textil y a su vez que estas investigaciones sean realizadas en base a la realidad actual de los países asiáticos.

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSIÓN

Criterio	Descripción
C1	Disponible en su versión completa.
C2	Información sobre la contaminación hídrica en la industria textil.
C3	Realizadas de acuerdo a la realidad actual de países asiáticos.

De la misma manera, se tienen en cuenta los criterios de exclusión mostrados en la tabla III, en donde se descartaron aquellos estudios que no presentan información completa, es decir, poseen datos insuficientes; artículos que no muestran resultados verificables, por lo mismo no son confiables; y aquellos que están fuera del rango de años establecido (2020-2025).

TABLA III
CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

Criterio	Descripción
C1	Estudios con información incompleta.
C2	No presentan resultados verificables.
C3	Publicaciones fuera del rango definido (2020-2025).

Finalmente, para cumplir con los objetivos de esta investigación se trabajó con la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) como se muestra en la Fig.1, en donde se rechazaron 97 investigaciones por no pertenecer a los últimos 5 años es decir 2020-2025, se excluyeron 193 publicaciones por no corresponder a las áreas de ingeniería y ciencias sociales, 20 por no contener las palabras claves necesarias para nuestra revisión, 40 investigaciones por no pertenecer a los países de Asia y 9 publicaciones por no ser del tipo de documento que se solicita, por otro lado, no se descartó ningún documento por el idioma ya sea en inglés o español. Es así que el número final de estudios que se consideraron para esta revisión fueron 46.

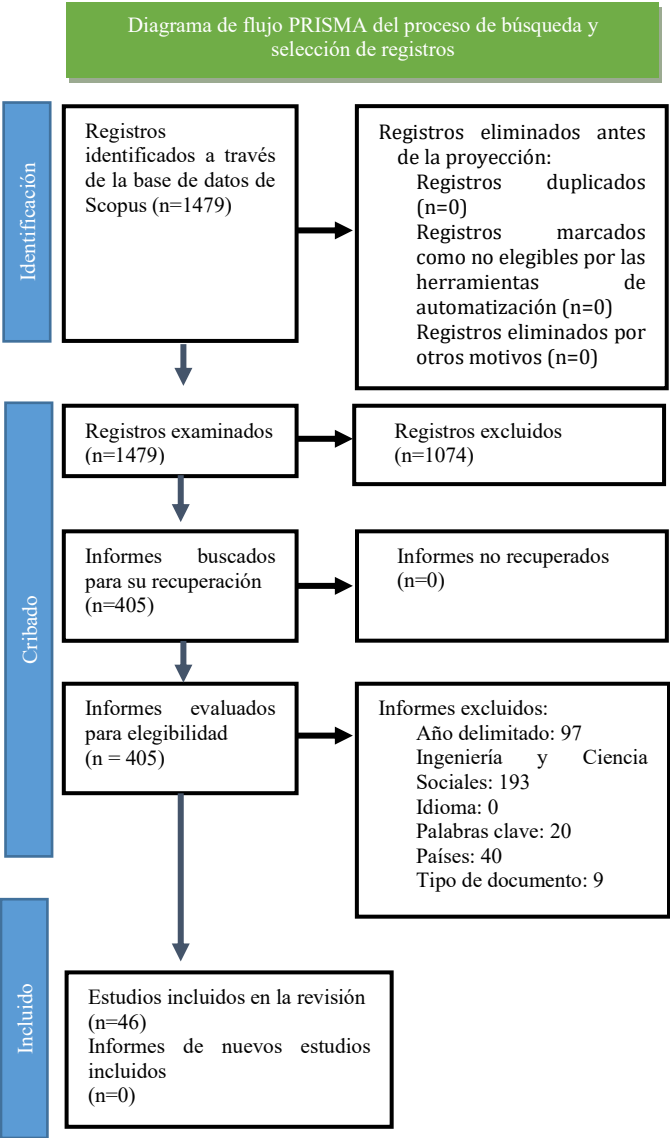


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA

III. RESULTADOS

En la Fig. 2, se visualiza la cantidad de investigaciones que fueron publicadas durante el periodo 2020-2025, es así que se muestra al año 2020 con 10 publicaciones siendo un alto número, sin embargo, el año con mayor cantidad de documentos publicados es el 2024, contando con 12 publicaciones, caso contrario se tiene al año 2021 con solo 3 publicaciones, seguido del 2022 con 6 documentos. Esta figura indica que a pesar de la forma ascendente que va tomando desde 2021 hasta el 2024, se muestra un declive en el 2025 presentándose 8 artículos, esto se debe a diversos factores como por ejemplo la perdida de interés de la población o dificultades en obtener un financiamiento.

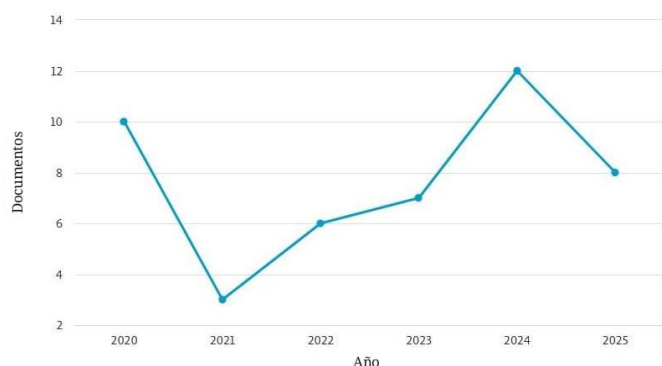


Fig. 2 Documentos publicados por año

En la Fig. 3, se muestra la cantidad de documentos analizados según cada país. En primer lugar, se tiene a Pakistán y a Arabia Saudita con un total de 14 publicaciones, continuando con 11 artículos en la India, 5 investigaciones en China y en Bangladesh, entre otros. Estos tres últimos países al ser los que predominan en la producción y exportación textil representan los principales focos de atención en las investigaciones sobre sostenibilidad textil. Por otro lado, se muestra a Corea del Sur e Irán como los países con más baja cantidad de documentos presentando solo 1 documento por país, esto hace referencia a lo dicho anteriormente, ya que Corea del Sur e Irán no son los principales productores de textiles en este continente, pero fueron tomados en cuenta debido al rango de estudio de la investigación.

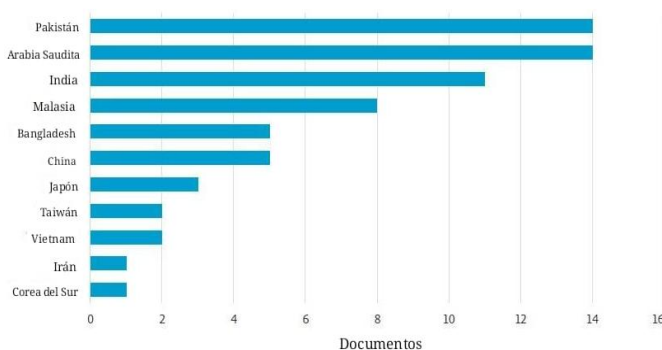


Fig. 3 Documentos publicados por país/territorio

En la Fig. 4, se muestra la cantidad de documentos que realizó cada autor. Se visualiza a los autores que más han contribuido con la publicación de artículos como por ejemplo Naveed M. que realizó 3 artículos siendo este el autor con mayor cantidad de documentos publicados a comparación de los demás, es así que un grupo significativo de 10 autores desde Abdullah N.H. hasta Ikhlq A. publicaron solo 2 artículos cada uno. Estos resultados evidencian que los documentos relacionados al tema no son elaborados por un solo autor, es decir, no se centraliza; más bien son distribuidos de manera amplia es por eso que cada autor contribuye una baja cantidad de artículos.

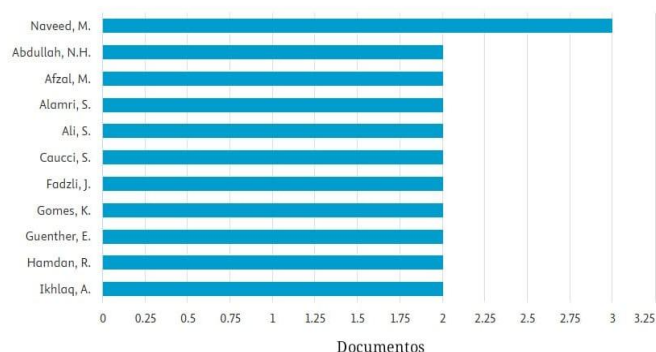


Fig. 4 Documentos por autor

En la Fig. 5, se visualiza la cantidad de documentos que fueron publicados por cada institución en la que están afiliados los autores de estos artículos. Es así que se tiene a la Universidad de Rey Saud (Arabia Saudita) como la institución con mayores publicaciones de documentos siendo estos 6, indicando el compromiso que tiene esta universidad con sus estudiantes y el buen desempeño de sus profesionales para lograr publicaciones en la base de datos Scopus; luego se tiene a la Universidad Tecnológica MARA (Malasia) y a la Universidad de Agricultura de Faisalabad (Pakistán) contando cada una de ellas con 4 artículos publicados; seguido de la Universidad de Gobierno de Faisalabad (Pakistán) con 3 documentos indexados; finalmente se observa que 6 de las instituciones restantes presentan la misma cantidad de documentos publicados siendo estos 2.

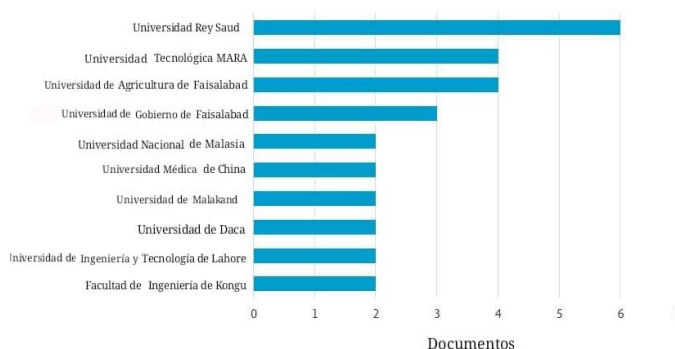


Fig. 5 Documentos por afiliación

En la Fig. 6, se muestra un gráfico de barras con los patrocinadores financieros y la cantidad de investigaciones pertenecientes a la base de datos Scopus que han patrocinado, siendo la Universidad Rey Saud (Arabia Saudita) la institución que más investigaciones ha patrocinado, estando detrás de al menos 6 documentos en la base de datos mencionada anteriormente, demostrando así su dedicación a la investigación y su interés en crear métodos nuevos para el tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, se encuentran otras instituciones como el Consejo de Investigación Científica e Industrial de Bangladesh, el Departamento y Ministerio de Ciencia y Tecnología (India), la Comisión de Educación Superior de Pakistán, entre otras; que

contribuyeron a la investigación con por lo menos dos documentos auspiciados en la base de datos Scopus.

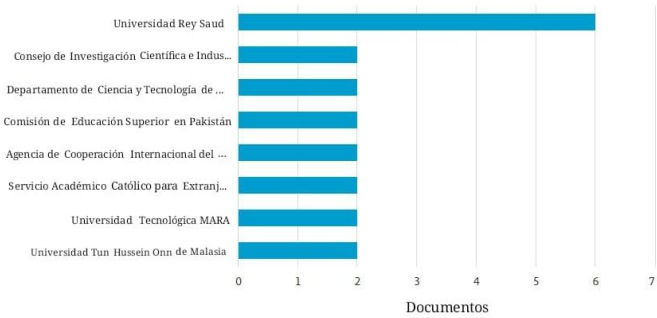


Fig. 6 Documentos por patrocinador de financiación

En la Fig. 7, se aprecian los documentos publicados por año, pero agrupados según la fuente de publicación. Se tiene que la revista Water Switzerland representado por el color azul, logró publicar su mayor cantidad de documentos, es decir 5, en el año 2023, mientras que en el año 2021 solo publicó 1 documento; la revista Desalination and Water Treatment representado por el color anaranjado, presentó 5 documentos siendo este su máximo de artículos dado en el año 2024; en la revista Sustainability Switzerland representado por el color morado se observa un descenso en las publicaciones; mientras que en la revista Case Studies in Chemical and Environmental Engineering representado por el color rojo se observa una línea constante; por último se tiene a la revista Textile and Leather Review representado de color verde donde se visualiza que solo publicó 2 documentos en el año 2024.

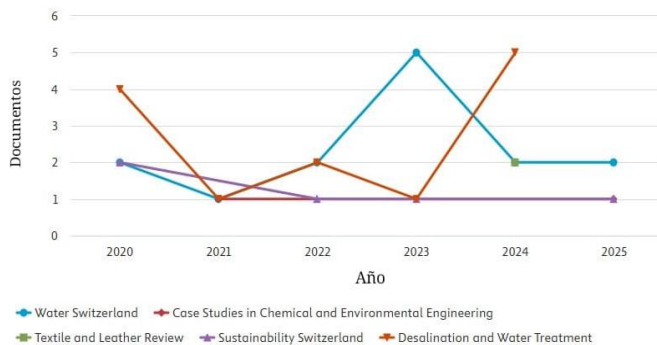


Fig. 7 Documentos por año fuente

En la Fig. 8, se presenta el análisis gráfico generado mediante el software VOSviewer en el cual se basó de los 46 documentos limitados con el fin de obtener una mejor representación visual. A continuación, se tiene que cada nodo representa una palabra clave y su tamaño está relacionado con la cantidad de veces que se menciona esa palabra, es así que se tiene a los términos “eliminación de contaminantes”, “tratamiento de aguas residuales” y “aguas residuales textiles” como las palabras más repetidas. Dicho esto, se visualizan 3 colores siendo estos rojo, verde y azul en donde; el agrupamiento central está relacionado con el verde, el cual menciona principalmente al tratamiento de aguas residuales, además de la industria textil, aguas residuales textiles y la sostenibilidad; el agrupamiento rojo menciona eliminación de

contaminantes, tintes, textiles, aguas residuales, entre otros; y por último se tiene al agrupamiento color azul que señala efluentes textiles, adsorción, efluentes y metales pesados.

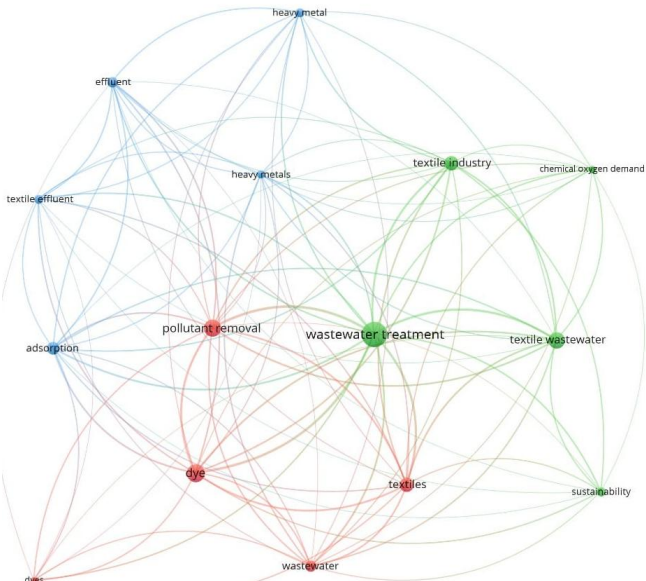


Fig. 8 Análisis gráfico usando VOSviewer

IV. DISCUSIÓN

Debido a la contaminación hídrica que genera la industria textil se propone el tratamiento de aguas residuales, es así que dos grupos de autores proponen el proceso de coagulación, para ser específicos la coagulación natural, para eliminar partículas en suspensión, contaminantes orgánicos, sustancias biodegradables, coloración de aguas residuales textiles y turbidez, sabiendo que los coagulantes naturales pueden ser derivados de fuentes vegetales o microbianas [30,31]. En este caso tendremos como coagulantes naturales a las semillas de las frutas de papaya y dátil, ya que en el caso de las semillas de papaya estudios demuestran que contienen proteínas con cargas positivas que les proporciona propiedades coagulantes [30], y en el caso de las semillas de palma datilera según estudios preliminares su uso como coagulante tuvo un rendimiento de 62,54% para remover la turbidez de las aguas residuales [31]. Ambos grupos de autores coinciden en que estas semillas se usan en forma de polvo, encontrándose agentes coagulantes activos y tejidos vegetales, sin embargo, otros componentes como el aceite y lípidos que estas presentan dificultan su uso como coagulantes, es por ello que se decide extraer los agentes coagulantes activos para aumentar la eficacia de coagulación siendo el principal disolvente utilizado el agua destilada. Por otro lado, Fadzli et al. refutan ello indicando que los procesos de coagulación convencionales presentan desventajas, por ello proponen el proceso de electrocoagulación que si bien es un proceso que deriva de la coagulación química, es más avanzado y presenta múltiples ventajas, una de ellas es que permite un mejor

control sobre la formación del coagulante en el agua y que en contraste con la coagulación natural este resulta un proceso de coagulación más eficaz [32]. A diferencia de la coagulación vegetal que usó a las semillas como coagulantes, aquí se empleará electrodos de aluminio (Al) o hierro (Fe) para el proceso de electrocoagulación, en donde se observa que los electrodos de aluminio (Al) eliminaron más carbono orgánico total (COT) que los electrodos de hierro (Fe), teniendo que el aluminio (Al) eliminó el 42,5% de COT [32]. Pese a las múltiples ventajas que posee este proceso, se presentan dificultades que afectan la eficiencia del tratamiento en el proceso de electrocoagulación, como la variación del grupo funcional de los colorantes reactivos en las aguas residuales textiles.

Asimismo, los métodos sostenibles para lograr la eliminación de los colorantes en efluentes textiles se deben a la creciente tendencia de urbanización e industrialización, se estima que el sector textil utiliza aproximadamente el 80% de los tintes azoicos para teñir, y entre el 10% y el 15% del tinte no se une a las fibras durante el proceso y, por lo tanto, se libera al medio ambiente, hay informes que hablan sobre el uso de procesos de tratamiento físico y químico para la eliminación del color de efluentes que contienen colorantes, sin embargo, estos enfoques de tratamiento tienen algunas limitaciones, como ser comercialmente inviables y tener una aplicabilidad limitada para eliminar por completo los colorantes azoicos resistentes y sus subproductos orgánicos [33]. Pero en el caso positivo de la absorción y su uso de *Escherichia coli* que alcanza una degradación del 89,88% del tinte Basic Orange 2 con las condiciones controladas de pH, temperatura y la concentración de nutrientes, junto a otros procesos como el de la caolinita activada con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y glauconita modificado con hidróxido de sodio (NaOH), alcanzo un 93% y 80% para el azul metileno (MB) y rojo Congo (CR), respectivamente, esto pone en evidencia que el método de absorción es uno de los menos costosos y que ha dado buenos resultados en el tratamiento para eliminar colorantes de fuentes residuales [34,35]. Por otra parte, un estudio menciona que el uso de reactores de circuito rociado con ozono representa una de las innovaciones más prometedoras dentro del tratamiento avanzado de efluentes textiles. Este sistema multifásico permite una oxidación directa de los colorantes disueltos, logrando la ruptura de los enlaces cromóforos y, con ello, una decoloración de hasta el 93 % para el rojo Congo y el azul de metileno, mostrando una opción tecnológicamente más limpia y que es posible reemplazar el proceso de separación térmica que consume mucha energía [36].

Por otro lado, en los últimos años se resalta particularmente la utilización de nanotecnología en el diseño de nuevos métodos para el tratamiento de aguas residuales en especial para la adsorción de tintes. En primer lugar, tenemos a Alam et al. quienes proponen la utilización de nanopartículas de cobre como adsorbente para la adsorción del amarillo de metanilo, el cual se utiliza en la industria textil como colorante

azoico hidrosoluble para teñir mayormente nailon, lana y seda y a su vez es una sustancia tóxica y cancerígena; también proponen el uso de nanopartículas bimetalicas para la rodamina B, la cual se utiliza en esta industria para teñir fibras naturales y sintéticas, siendo esta regulada por su alta toxicidad al igual que el metanilo. Para ambos tipos de colorantes se hicieron pruebas por lotes para determinar los parámetros de adsorción dando como resultado que en el caso del amarillo metanilo el equilibrio se alcanzó en 30 minutos mientras que para la rodamina B el equilibrio se alcanzó en 12 minutos [37]. En segundo lugar, tenemos a Jamil et al. quienes sugieren los nanoadsorbentes a base de bentonita, arcilla y nanotubos de carbono. Para este estudio se utilizaron diferentes metodologías como la microscopía de barrido (SEM), la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis de Brunauer-Emmett-Teller (BET) y rayos X de energía dispersiva (EDX) para determinar los cambios en la morfología de la superficie, el grupo funcional y el área superficial del adsorbente obteniéndose como resultado una aplicación exitosa de un adsorbente a base de arcilla bentonita en el tratamiento de aguas residuales textiles [38]. Por último, tenemos a Egbosiuba et al. quienes evalúan el desempeño de los nanotubos de carbono multipared aminorados con nanopartículas de hierro cerovalente sintetizadas a partir de extracto de hoja de anarcado (AM-MWCNTs@ZVI) para el secuestro de colorantes tóxicos mediante análisis FTIR, BET, la difracción de rayos X (XRD), la microscopía electrónica de barrido de alta resolución (HRSEM) y la microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) dando como resultado de los experimentos de adsorción por lotes, parámetros óptimos y capacidad de reutilización con una eficiencia de remoción del 88% y el 85% para CR y MB, respectivamente, después de seis ciclos lo cual destaca a AM-MWCNTs@ZVI como adsorbente eficaz y reciclable para el tratamiento de aguas residuales textiles [39].

V. CONCLUSIÓN

En esta revisión sistemática se identificó que la contaminación del agua producida por la industria textil es uno de los desafíos ambientales más importantes a nivel global. Los tratamientos convencionales tienden a volverse obsoletos, pero por otro lado las nuevas alternativas muestran resultados prometedores. Por ejemplo, el proceso de electrocoagulación deja de lado el método tradicional de coagulación, aunque si este se da con componentes naturales como el polvo de semillas de frutas, presentan un mayor beneficio ya que la semilla de dátil elimina ciertos contaminantes en un 62,54% mientras que el ion Al el 42,5%. En otro de los estudios la *escherichia coli* logró mejorar la capacidad de degradación del tinte Basic Orange 2 hasta un 89,88 %. En otro caso, la caolinita tratada con ácido logro alcanzar una eliminación superior al 93 % del azul de metileno, logrando hacer el proceso más rápido. Asimismo, la glauconita activada con 2 M de NaOH logró una eficiencia de adsorción cercana al 80 %, y

finalmente el reactor de circuito con ozono logro una decoloración del 93 % para el rojo Congo y 85 % para el azul de metileno.

Se observó también que las principales barreras para la aplicación de estos métodos para tratamiento de aguas residuales generadas por la industria textil son los altos costos de inversión y operación, la falta de cumplimiento de las normativas ambientales, así como también la falta de programas de educación ambiental en el sector industrial.

En conclusión, los estudios revisados evidencian cierta efectividad en los distintos métodos utilizados para el tratamiento de aguas residuales, por lo que se recomendaría evaluar el impacto económico de la adaptación de estos métodos a las empresas para minimizar el impacto generado por la industria textil en el agua.

REFERENCIAS

- [1] J. Bello, "Hilos de cambio: entretejer soluciones para disminuir la acumulación de residuos textiles", Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), abril 2025. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/declaraciones/hilos-de-cambio-entreteter-soluciones-para-disminuir-la>
- [2] "La moda rápida alimenta la crisis mundial de los residuos", Noticias ONU, marzo 2025. <https://news.un.org/es/story/2025/03/1537631>
- [3] N. Palou, "La fabricación de nuestra ropa está matando los ríos africanos", La Vanguardia, 2021. <https://www.lavanguardia.com/natural/20210819/7671013/industria-textil-contaminacion-rios-africa-informe-water-witness-moda-rapida.html>
- [4] "Asia sigue siendo la "fábrica de ropa del mundo", pero se enfrenta a numerosos retos en la evolución de la industria", Organización Internacional del Trabajo (OIT), junio 2022. <https://www.ilo.org/es/resource/news/asia-sigue-siendo-la-fabrica-de-ropa-del-mundo-pero-se-enfrenta-numerosos-retos-en-la-evolucion-de-la-industria>
- [5] K. Gomes, S. Caucci, J. Morris, E. Guenther, y J. Miggelbrink, "Transformación hacia la sostenibilidad en la industria textil: el caso de la gestión de aguas residuales", Business Strategy and Development, 2024. <https://doi.org/10.1002/bsd2.324>
- [6] Ch. D. Raman, N. Akash, M. Kaviyarasu, y N. Rajkumar, "Partículas de hierro verde en la decoloración de aguas residuales de la industria textil y de baños de tinte", Desalination and Water Treatment, vol. 276, pp. 175-184, 2022. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28942>
- [7] S. A. Mulyadi, T. E. T. Z. Mulok, N. H. Hussain, y R. M. Nor, "Biorremediación de aguas residuales textiles mediante Pleurotus pulmonarius", Journal of Sustainability Science and Management, vol. 17, no. 2, pp. 67-76, 2022. <https://doi.org/10.46754/jssm.2022.02.007>
- [8] K. Munirgi, G. Raju, B. Asha, y G. Manikandan, "Polvo de hojas de limón como biosorbente para la eliminación de metales tóxicos en fase líquida de efluentes textiles", Desalination and Water Treatment, vol. 196, pp. 422-432, agosto 2020. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26084>
- [9] H. Yin, et al., "Fibras de lana de desecho modificadas con NH_2 - UiO-66 (Zr) para la adsorción eficiente de colorantes del agua", Desalination and Water Treatment, vol. 318, abril 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100305>
- [10] T. Singhopon, K. Shinoda, S. Rujakom, y F. Kazama, "Factores que afectan la eliminación simultánea de nitrato y colorante reactivo negro 5 mediante desnitrificación basada en hidrógeno", Water, vol. 13, no. 7, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13070922>
- [11] Z. Naseem, M. Naveed, H. N. Asghar, y M. Hameed, "Enterobacter cloacae ZA14 resistente a metales: mejora del vigor de las plántulas y la tolerancia a los metales mediante la mejora del crecimiento, la fisiología y los antioxidantes en tomate (Solanum lycopersicum) irrigado con efluentes textiles", Sustainability, vol. 14, no. 20, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142013619>
- [12] A. A. Zahuri, et al., "Decoloración de aguas residuales de tintes textiles industriales y sintéticos reales mediante dolomita activada", Water, vol. 15, no. 6, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15061172>
- [13] G. Anil, J. Scaria, y P. V. Nidheesh, "Eliminación de tinte sintético de una solución acuosa mediante el proceso electro-Fenton heterogéneo catalizado por MnFe_2O_4 - GO", Water, vol. 14, no. 20, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14203350>
- [14] G. Mugaishudeen, et al., "Reactor de flujo descendente en bucle de chorro con sistema de membrana NF-RO para el tratamiento de aguas residuales textiles", Desalination and Water Treatment, vol. 320, octubre 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100763>
- [15] K. Gomes, J. Morris, J. Miggelbrink, E. Guenther, y S. Caucci, "Nexo de recursos para la toma de decisiones: un enfoque sinérgico entre la industria y la comunidad para la gestión de aguas residuales textiles", Local Environment, vol. 30, no. 2, pp. 231-252, 2025. <https://doi.org/10.1080/13549839.2024.2423762>
- [16] S. B. Malitha, et al., "Eliminación del colorante textil comercial DRMD de las aguas residuales mediante un adsorbente de óxido de grafeno mesoporoso bidimensional", Textile & Leather Review, vol. 7, pp. 616-543, 2024. <https://doi.org/10.31881/TLR.2024.039>
- [17] S. Ch. Das, et al., "Evaluación del potencial biocatalítico de coenzimas derivadas de cáscaras de frutas para el tratamiento sostenible de aguas residuales textiles", Results in Engineering, vol. 21, marzo 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101898>
- [18] M. Tabish, et al., "Tratamiento físico, químico y biológico de aguas residuales textiles para la eliminación de colorantes y metales pesados", Desalination and Water Treatment, vol. 320, octubre 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100842>
- [19] Z. Ali, et al., "Eliminación del colorante Disperse Yellow-42 mediante ozonización catalítica utilizando zeolitas cargadas con hierro y manganeso", Water, vol. 15, no. 17, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15173097>
- [20] Z. Naseem, et al., "Aclaración del potencial de la bacteria Enterobacter cloacae ZA14, degradadora de colorantes, para el cultivo de plantas de Solanum lycopersicum con efluentes textiles", Water, vol. 15, no. 17, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15173163>
- [21] F. Wei, et al., "Implementación de humedales flotantes para el tratamiento de aguas residuales textiles: una revisión", Sustainability, vol. 12, no. 14, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12145801>
- [22] J. A. S. Othman, et al., "Desarrollo y caracterización de adsorbentes magnéticos de polietilenimina-nanocelulosa de bambú para mejorar el rendimiento de la eliminación de contaminantes colorantes", Bioresources and Bioprocessing, vol. 12, no. 86, agosto 2025. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00928-y>
- [23] J. Fadzli, K. H. K. Hamid, N. R. N. Him, y S. W. Puasa, "Una revisión crítica sobre el tratamiento de aguas residuales con colorantes reactivos", Desalination and Water Treatment, vol. 257, pp. 185-203, mayo 2022. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28028>
- [24] M. E. Rodrigues, R. Cucciniello, A. Farinha, J. Vrouwenvelder, y L. Fortunato, "Desafíos de humectación en el tratamiento de aguas residuales textiles crudas mediante destilación por membrana: Un estudio de caso", Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, vol. 11, junio 2025. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101197>
- [25] S. L. Sandhya Rani, y R. V. Kumar, "Perspectivas sobre las aplicaciones de membranas cerámicas de bajo costo en el tratamiento de aguas residuales: una minirevisión", Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, vol. 4, diciembre 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100149>
- [26] A. M. Alotaibi, et al., "Utilización del fosfoyeso como adsorbente sostenible para la eliminación del colorante violeta cristal de las aguas residuales: cinética, termodinámica y aplicaciones en el tratamiento de efluentes textiles", Sustainability, vol. 17, no. 8, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17083320>
- [27] M. A. Irshad, et al., "Tratamiento verde y ecológico de aguas residuales textiles mediante el uso de extracto de hoja de Azadirachta indica combinado con una solución de nitrato de plata", Sustainability, vol. 15, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15010081>

- [28] F.Javeed, B. Firdaus, M. Shafiq, A. Nazir, y M. Scholz, "Optimización de parámetros seleccionados en sistemas de humedales construidos de flujo superficial vertical, horizontal e híbrido para mejorar la eficiencia del tratamiento de efluentes textiles y de aguas residuales", *Water*, vol. 17, no. 3, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17030402>
- [29] A.Tumanyisibwe, M.Nasr, M. Fujii, y M. G. Ibrahim, "Digestión anaeróbica de aguas residuales de la industria de tintes y residuos agrícolas con recuperación de bioenergía y biocarbón: un enfoque tecnoeconómico y sostenible", *Water*, vol. 16, no. 14, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16142025>
- [30] M. H. A. R. Adrin, N. Ngadiman, N. H. Abdullah, R. Hamdan, y M. S. Abdullah, "Investigación de la eficiencia de diferentes masas de semillas de papaya como coagulantes naturales en el proceso de tratamiento de aguas residuales textiles", *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 133, no. 1, pp. 135-148, septiembre 2025. <https://doi.org/10.37934/aram.133.1.135148>
- [31] M. H. A. R. Adrin, N. Ngadiman, R. Hamdan, N. H. Abdullah, y Z. Siddiqui, "Eficacia de la semilla seca de dátil como coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales", *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, vol. 15, no. 3, pp.168-177, 2024. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2024.15.03.015>
- [32] J. Fadzli, S. W. Puasa, N. R. Nik Him, K. H. Ku Hamid, y N. Amri, "Electrocoagulación: Eliminación del color y la DQO de aguas residuales simuladas y reales de batik", *Desalination and Water Treatment*, vol. 320, octubre 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100658>
- [33] M. Ikram, et al., "Degradación biológica del tinte azoico Basic Orange 2 por *Escherichia coli*: un enfoque sostenible y ecológico para el tratamiento de aguas residuales textiles", *Water*, vol. 14, no. 13, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14132063>
- [34] N. Hamri, et al., "Capacidad de adsorción mejorada del tinte azul de metileno sobre caolín mediante tratamiento ácido: estudios de adsorción por lotes y aprendizaje automático", *Water*, vol. 16, no. 2, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16020243>
- [35] A. Hamd, et al., "Glauconita natural activada con NaOH para la adsorción de bajo costo de tinte rojo Congo", *Water*, vol. 15, no. 21, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15213753>
- [36] G. Mugaishudeen, M. Harish, y R. Singaraja Gopal, "Eliminación de azul de metileno y rojo Congo de las aguas residuales en un reactor jet loop utilizando ozono y carbón activado", *Desalination and Water Treatment*, vol. 319, Julio 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100471>
- [37] S. Alam, et al., "Síntesis de nanopartículas metálicas y su aplicación en la adsorción de amarillo de metanilo y rodamina B desde soluciones acuosas", *Desalination and Water Treatment*, vol. 313, noviembre 2023. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.30057>
- [38] T. Jamil, et al., "Nanoadsorbente a base de bentonita, arcilla y nanotubos de carbono/NTC para el tratamiento de aguas residuales textiles: optimización de los parámetros del proceso", *Water*, vol. 15, no. 18, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15183197>
- [39] T. Ch. Egbosiuba, et al., "Evaluación del rendimiento de nanotubos de carbono de paredes múltiples aminados incorporados con nanopartículas de hierro sintetizadas mediante métodos ecológicos para la eliminación de colorantes tóxicos de aguas residuales textiles", *Water Resources and Industry*, vol. 33, junio 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2025.100291>