

Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales del sector textil en Colombia: una revisión

Wastewater treatment and environmental problems of the textile sector in Colombia: a review

Julio Cesar Ramírez-Rodríguez¹

¹Universidad de La Salle. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia).

Correo electrónico: juliocramirezr@yahoo.es

orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3238-7815>

Recibido: 02-12-2022 Aceptado: 27-03-2023

Cómo citar: Ramírez-Rodríguez, Julio (2023). Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales del sector textil en Colombia: una revisión. *Informador Técnico*, 87(1), 82-106.
<https://doi.org/10.23850/22565035.5304>

Resumen

La industria textil representa una figura decisiva debido a los impactos negativos que generan sus procesos productivos en materia de calidad del agua, aire, suelo y la gestión de sus residuos. En especial, existe gran preocupación sobre el recurso hídrico, por las cantidades y los tipos de químicos que emplea esta industria. Por ello, en este artículo se lleva a cabo una revisión sobre la problemática de las aguas residuales provenientes de la industria textil y los avances tecnológicos para el tratamiento de estas. Como resultado se encuentra que, las pequeñas y medianas empresas corresponden al sector de las empresas más vulnerables en términos de su capacidad para enfrentar la creciente presión social, regulatoria y de fiscalización en materia ambiental, con necesidades de bienes y servicios ambientales que se encrujecen a raíz de la informalidad de muchas empresas, a las que, por ende, no se les realiza ningún tipo de control por parte de las autoridades ambientales. Así mismo, se identificaron diferentes metodologías de tratamiento de aguas residuales textiles, que incluyen técnicas combinadas, como la electrocoagulación y electro-oxidación, procesos avanzados de oxidación (PAO), Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) o foto-Fenton ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$), entre otros, que garantizan altos rendimientos en la eliminación, por ejemplo, de parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y el color. Adicional a ello, se resalta el uso de nanomateriales de Titania como buenos adsorbentes de metales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), zinc (Zn), y níquel (Ni) y, como alternativa de bajo costo para las pequeñas empresas, materiales de desecho y minerales como buenos adsorbentes de colorantes, que se pueden reutilizar con altas eficiencias en varios ciclos.

Palabras clave: contaminación; MiPymes; textil; tratamiento de aguas.

Abstract

The textile industry represents a decisive figure due to the negative impacts generated by its production processes on the quality of water, air, soil, and waste management. In particular, there is great concern about water resources, due to the quantities and types of chemicals used by this industry. For this reason, this article

reviews the problems of wastewater from the textile industry and the technological advances for its treatment. As a result, it is found that small and medium-sized companies correspond to the most vulnerable sector in terms of their capacity to face the growing social, regulatory, and fiscal pressure in environmental matters, with needs for environmental goods and services that are increasing due to the informality of many companies, which, therefore, are not subject to any type of control by the environmental authorities. Different textile wastewater treatment methodologies were identified, including combined techniques such as electrocoagulation and electro-oxidation, advanced oxidation processes (PAO), Fenton (H_2O_2/Fe^{2+}) or photo-Fenton ($UV/H_2O_2/Fe^{2+}$), among others, which guarantee high performance in the elimination, for example, of parameters such as chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), and color. In addition, the use of titania nanomaterials as good adsorbents of metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), copper (Cu), zinc (Zn), and nickel (Ni) and, as a low-cost alternative for small companies, waste materials, and minerals as good adsorbents of dyes, which can be reused with high efficiencies in several cycles.

Keywords: MiPymes; pollution; textile; water treatment.

1. Introducción

Desde la perspectiva de diferentes actores gubernamentales, el cambio climático ha tenido repercusiones devastadoras sobre los recursos hídricos a nivel mundial, hecho que reduce su disponibilidad en términos de cantidad y calidad. Por otra parte, en el Informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2020) sobre el desarrollo del agua, se establece que el incremento de la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos amenaza el desarrollo socioeconómico sostenible y la biodiversidad en todo el mundo, en especial en las fuentes de abastecimiento de agua.

Si bien se han determinado diferentes escenarios de vulnerabilidad y posibles soluciones, cada año se exacerbaban los desafíos asociados con la gestión sustentable del agua. Por ese motivo, es imperativo seguir y fortalecer los compromisos globales para proteger un futuro sostenible. El cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la agenda 2030 dependen en gran medida de la gestión del agua mejorada (ONU, 2022).

En este contexto, según las caracterizaciones obtenidas en el Informe de la ONU, los factores que más dificultan la gobernanza son la seguridad alimentaria, la salud humana, los asentamientos urbanos y rurales, la producción de energía, el desarrollo industrial, el crecimiento económico y el crecimiento poblacional.

Todas las variables referenciadas coexisten y dependen una de otra; sin embargo, el crecimiento poblacional, el desarrollo industrial y el crecimiento económico encabezan las prioridades de las políticas de Desarrollo Sostenible de la ONU, considerando los incrementos exponenciales en las demandas de agua que han registrado en los últimos cien años. Según se representa en la Figura 1, el sector agrícola es el que mayores requerimientos de agua tiene, seguido del industrial, el doméstico y energético.

Por su parte, la industria manufacturera tiene un rol importante en este panorama, según estipula La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, citado en Day, 2019), dado que, como se observa en la Figura 2, puede incrementar su consumo de agua en un 400 % para el año 2050, en comparación con el consumo del año 2000.

Este análisis permite señalar que se debe invertir en la gestión de actores gubernamentales que articulen políticas de sostenibilidad, con el fin de reducir el impacto de las industrias que engloban al sector de la manufactura.

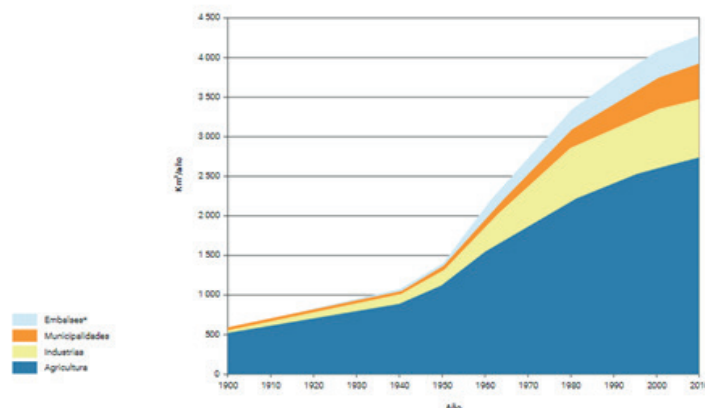


Figura 1. Demanda histórica de agua sectorial
Fuente: ONU (2020).

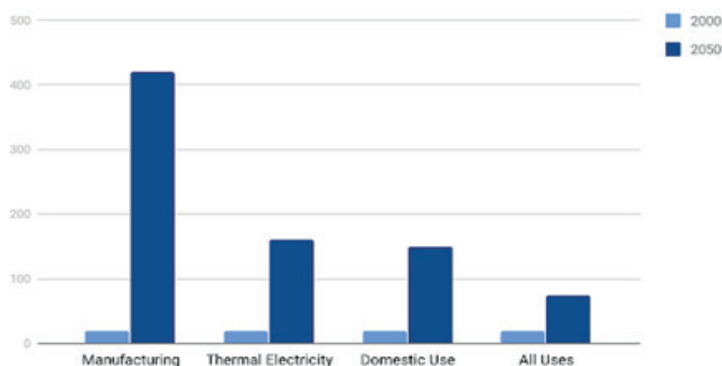


Figura 2. Aumento porcentual de la demanda de agua
Fuente: Day (2019).

Justamente, en esta revisión se hace hincapié en los impactos que genera la industria textil; la cual, de acuerdo con Niinimäki *et al.* (2020), produce aproximadamente el 10 % de las emisiones mundiales (más de 1.700 millones de toneladas de CO₂), es el segundo mayor consumidor de agua (1,5 billones de litro al año), responsable del 20 % de la contaminación del agua industrial procedente del tratamiento y el teñido de textiles, y contribuye al 35 % (190.000 toneladas al año).

La problemática anterior se ha agudizado en los últimos años a raíz de diferentes fenómenos; sin embargo, el de mayor impacto es el denominado fast fashion, el cual, de acuerdo con Gomes *et al.* (2022), consiste en la fabricación de indumentaria masiva que se vende a bajo precio, hecho que incrementa la frecuencia de compra.

Además, es una de las industrias que más residuos líquidos contaminantes emite. De acuerdo con Zafar *et al.* (2021), la industria textil genera alrededor de 100 toneladas de efluentes de tintes por año, que contribuyen a la contaminación del agua con efluentes, que se caracterizan por altas concentraciones de carbono orgánico total (TOC), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), color, demanda química de oxígeno (DQO) y sales.

Precisamente, la Corporación Financiera Internacional (IFC, 2007), en sus guías sobre medio ambiente, salud y seguridad, establece que las aguas residuales provenientes de esta industria registran valores de DBO en un rango de 700 a 2.000 mg O₂/L, en adición a contaminantes que incluyen sólidos en suspensión, aceites minerales, compuestos orgánicos (fenoles procedentes del acabado húmedo), y sustancias orgánicas halogenadas derivadas del uso de disolventes durante el blanqueo. Además, se resalta, de acuerdo con Almansba *et al.* (2021),

que estos contaminantes orgánicos, en su gran mayoría, tienen una baja biodegradabilidad y, en tratamientos convencionales, como la coagulación, filtración o la adsorción, poseen un bajo porcentaje de eliminación, donde simplemente se presenta una transferencia de los contaminantes de una fase a otra.

Frente a este panorama, Colombia no ha sido ajena, si bien se han desarrollado estrategias de financiación y apoyo técnico, no ha sido suficiente, aún existen dificultades estructurales, principalmente en el sector de las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes) relacionadas con aspectos financieros, que incluyen, entre otras, baja capacidad de inversión y aspectos fiscales, estos últimos comúnmente generados por el incumplimiento de normas y lineamientos establecidos por las autoridades ambientales.

En ese orden de ideas, es de vital importancia considerar la incidencia que tienen las MiPymes nacionales del sector de la industria textil en el medio ambiente, particularmente en el recurso hídrico. De manera que, en este artículo, se llevará a cabo una revisión sobre la problemática de las aguas residuales provenientes de la industria textil y los avances tecnológicos para el tratamiento de estas. La importancia de identificar las principales características de las aguas residuales de esta industria y las dificultades existentes en el tratamiento de estas radica en evitar la contaminación del recurso hídrico y posibles afectaciones del ambiente y la salud de las comunidades, adicional a ello, profundizar en estos aspectos permite distinguir causas comunes con el fin de establecer alternativas de prevención y mitigación.

2. Marco teórico

Las MiPymes constituyen la base estructural del sector productivo nacional y la principal fuente generadora de empleo. Para la Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF, 2021), este sector representa más del 99 % de las empresas del país, que generan aproximadamente el 79 % del empleo y aportan el 40 % del Producto Interno Bruto (PIB). Su clasificación se realiza de acuerdo con el tipo de empresa (manufacturero, servicios, comercio), en función de los ingresos por actividades ordinarias anuales (UVT) discriminados en el Decreto 957 del 05 de junio de 2019 (Presidencia de la República, 2019).

En particular, Colombia, según cifras del Registro Único Empresarial y Social (RUES), cuenta con 35.111 empresas de confecciones, 215 de hilados y 7.294 de textil, de las cuales aproximadamente el 99,7 % son micro, pequeñas y medianas. Salazar (2021), señala la importancia de las MiPymes, pues representan el motor que impulsa este sector industrial, además de ser consideradas el principal empleador de mujeres dentro del sector manufacturero.

Por su parte, la Cámara de Comercio de la ciudad de Medellín señaló para el año 2018 un total de 14.920 empresas en actividades relacionadas con el clúster/textil /confección, diseño y moda, de esas 13.582 son microempresas, 1.260 son pymes y 78 son grandes empresas (Ossa, 2018, párr. 7).

Específicamente, se destaca al sector de acabados de productos textiles, dado que representa, de acuerdo con la IFC (citada en Cárdenas, 2019), “un conjunto de procesos que mejoran la apariencia, durabilidad o capacidad de servicio de los tejidos grises y crudos, convirtiéndolos en tejidos acabados” (p. 14), lo cual genera el uso intensivo de agua y el requerimiento de una variedad de sustancias químicas.

Es por ello, que se describen de forma generalizada los procesos ejecutados en el sector de acabados (ver Figura 3), de acuerdo con el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, citado en Asociación Bancaria y de Entidades Financieras de Colombia, 2019), Así pues, el primer proceso corresponde al desencolado, que consiste en eliminar las impurezas de los tejidos grises. A continuación, se realiza el descruce, que emplea como solvente el percloroetileno. Seguidamente, se realiza un mercerizado, es decir, el hinchamiento de las fibras mediante la aplicación de soluciones de álcalis cáusticos en frío, y cuyo principal objetivo es el de otorgar propiedades de resistencia a la tensión, afinidad del tinte y la resistencia a la abrasión.

Posteriormente, se debe realizar un blanqueo, para el cual los reactivos más frecuentes son el peróxido de hidrógeno, el hipoclorito de sodio, el clorito sódico y el gas de dióxido de azufre. Entre las consideraciones finales, está el teñido, etapa en la cual se emplean tintes que abarcan a los ácidos sulfónicos, tintes azoicos, bases orgánicas, sales de sodio, compuestos obtenidos del antraceno, tintes metalizados, tintes reactivos y compuestos de azufre (CEPIS, citado en Cárdenas, 2019). En suma, adicional al uso de tintes, la Fundación Suiza para el Desarrollo Sostenible en América Latina (FUNDES, 2001) menciona que se emplean sustancias auxiliares para disolver colorantes, evitar su degradación por el calor, lograr un remojo completo de los textiles, obtener uniformidad e incrementar la velocidad de absorción.

Otro aspecto de importancia es la reciente incursión del sector textil en la búsqueda de procedimientos que permitan funcionalizar los materiales a fin de mejorar propiedades tales como impermeabilidad, resistencia al fuego, autolimpieza fotocatalítica, disminución de la proliferación microbiana, protección UV y propiedades antiestáticas, entre otras. De acuerdo con el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA, 2004), lo anterior se logra por medio de la aplicación de baños que contiene sustancias entre las cuales se pueden mencionar a saber siliconas orgánicas, fluoruros o derivados de oxazolona para obtener telas a pruebas de manchas, entre otras sustancias presentes en soluciones acuosas.

En la Figura 3, se esquematizan los procesos de acabados de tejidos planos con sus respectivas entradas y salidas.

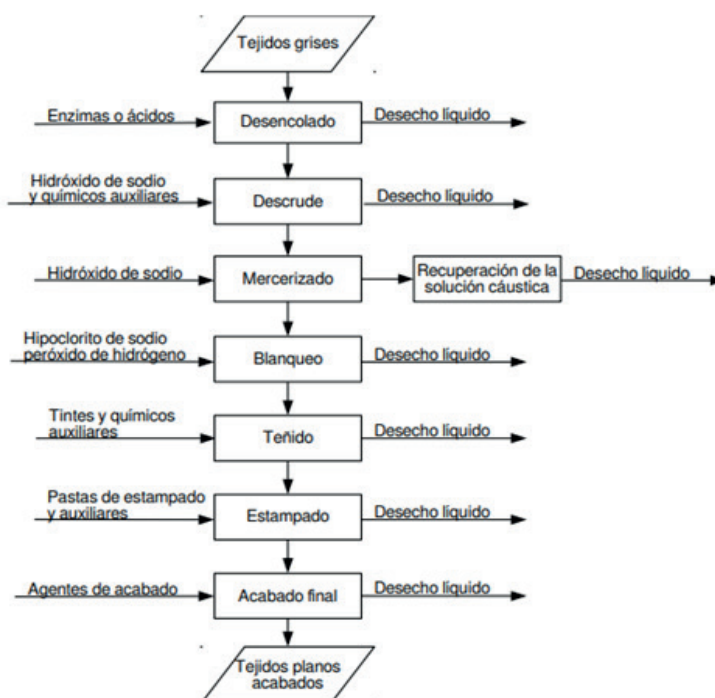


Figura 3. Acabados de tejidos planos
Fuente: CEPIS (citado en Cárdenas, 2019, p. 16).

Cabe señalar que la legislación colombiana, en el Decreto 1076 de 2015 (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2015), incluye entre los residuos peligrosos de la industria textil, todos aquellos que se generan como resultado de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices, la producción, la preparación y la utilización de disolventes orgánicos, entre otras. Precisamente, en la Figura 3, se evidencia el amplio uso de sustancias químicas contaminantes en cada uno de los procesos que involucran al sector de acabados de tejidos textiles, y en la Figura 4 se expone la variación, entre los años 2012 y 2017, de las cantidades de residuos peligrosos generadas por el sector textil.

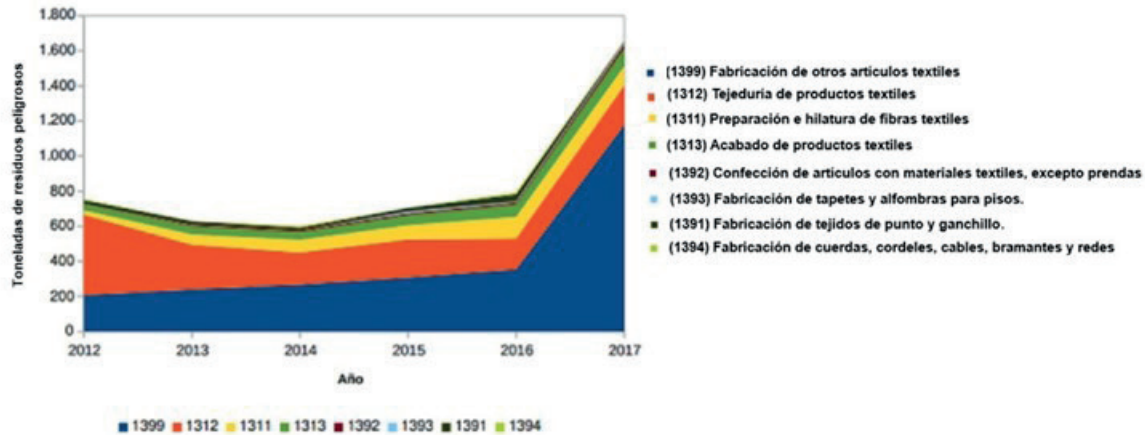


Figura 4. Cantidades de residuos peligrosos generados por el sector textil en años recientes de acuerdo con las estadísticas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

Fuente: Ideam (2019).

Nota. La leyenda corresponde a los códigos CIU de cada una de actividades productivas que conforman el sector textil.

Esta figura indica que las principales actividades económicas generadoras de residuos peligrosos en el sector textil corresponden, de acuerdo con los códigos CIU en cada una de las actividades productivas del sector textil, a la fabricación de otros artículos textiles (1.399) y la tejeduría de productos textiles (1.312) pertenecientes a la división (131) de preparación, hilatura, tejeduría y acabado de productos textiles. Justamente, según el Informe Nacional del Registro Único Ambiental Manufacturero (Ideam, 2017), en la ciudad de Bogotá, el sector de acabados es el primer generador de vertimientos, con 1,5 millones de metros cúbicos, y en el departamento de Antioquia, la tejeduría y el acabado de productos textiles generan vertimientos por 2,7 y 1,6 millones de metros cúbicos, respectivamente.

Al observar la realidad ambiental del sector de acabados, que coincide, según el DAMA (2004), “con la sección de la cadena que más valor le agrega a los productos y que por tanto más influye en la competitividad del sector” (p. 24), Por consiguiente, es fundamental el mejoramiento de la gestión ambiental de las empresas, para lo cual es necesario realizar valoraciones de sus indicadores de desempeño ambiental, en particular en el aspecto agua, que incluyan registros sobre la captación total de agua por fuentes, porcentaje y volumen total de agua reciclada o reutilizada y la determinación del vertimiento total de aguas residuales, según su naturaleza y destino.

En consecuencia, resulta necesaria la adopción de buenas prácticas ambientales, orientadas primordialmente a la prevención, con inversiones en la implementación de sistemas de tratamiento que, debido a la variedad de sustancias químicas y procesos, requerirán del uso de una o más unidades de tratamiento. A continuación, se menciona, de acuerdo con la IFC (2007), la clasificación de las técnicas empleadas de tratamiento de aguas residuales por origen y el pretratamiento de corrientes de aguas residuales, las cuales incluyen:

- Corrientes de carga elevada (DQO), que contengan compuestos no biodegradables mediante la oxidación química.
- Disminución de la concentración de metales pesados en los efluentes, por medio de técnicas como la precipitación química, procesos electroquímicos, adsorción, intercambio iónico y procesos con membranas semipermeables.
- El tratamiento de corrientes altamente coloreadas o con elevados niveles de sólidos disueltos totales (TDS), empleando, por ejemplo, la ósmosis inversa y adsorción (p. 8).

Así mismo, la Corporación Financiera Internacional resalta la necesidad de controles de ingeniería adicionales para la eliminación de metales, empleando, por ejemplo, filtros de membrana y técnicas como la adsorción y oxidación química avanzada, para la reducción de la toxicidad en los efluentes, y el uso de tecnologías como la ósmosis inversa, el intercambio iónico, el carbón activado, el confinamiento y la neutralización de olores molestos.

Como se evidencia, se requiere de un esfuerzo y de la implementación de instrumentos financieros que permitan a las MiPymes de la industria textil, prevenir la generación de impactos negativos en el recurso agua, y que mejoren sus niveles de competitividad.

En resumen, estos conceptos aportan criterios y perspectivas para desarrollar la investigación contextualizada en los diferentes tratamientos de aguas residuales del sector de acabados textiles, usos, características, y diagnóstico ambiental en las MiPymes colombianas.

3. Método

Según Barbosa *et al.* (2013), la construcción del marco teórico se realiza a partir de dos fases, la primera consiste en la recolección de la información bibliográfica, y la segunda analiza los documentos obtenidos en la fase anterior. La primera fase, heurística, se fundamenta en la selección de información de temas relacionados con el objeto de estudio, además, implica la construcción y definición de los criterios de búsqueda, de inclusión de fuentes de consulta y todos los demás conceptos que se considere que limiten o enriquezcan el trabajo investigativo.

Para ejecutar la búsqueda se utilizaron los operadores booleanos (AND, NOT, OR, XOR), términos o símbolos que se utilizan para darle a la búsqueda un orden lógico, de forma que se localizan los registros que contienen los términos correspondientes a uno de los campos especificados o en todos los campos. El operador AND (Y) indica que las palabras que anteceden y siguen al operador deben encontrarse en el resultado de la búsqueda. El NOT muestra que la palabra clave anterior al operador deberá aparecer, pero no la posterior. Por su parte, el OR (O) indica que cumple con que solo una de las palabras esté presente. En la mayoría de las herramientas de búsqueda puede reemplazarse por un espacio en blanco. Finalmente, el XOR especifica que de dos palabras clave, solo debe aparecer una (Barbosa *et al.*, 2013).

Paralelamente la segunda fase, es decir la hermenéutica o de análisis emplea los hallazgos de la fase anterior, y su finalidad es dar forma al documento para resumir los referentes, dando un orden coherente y ampliando de la información sobre el tema de este estudio.

Igualmente, el análisis se lleva a cabo partiendo de los principios de la revisión y análisis documental (RAD) del artículo de Barbosa *et al.* (2013), Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativas. A continuación, se presenta el protocolo de búsqueda de información (Tabla 1) y el formato ficha de revisión de documentos (Tabla 2).

Específicamente se emplearon las siguientes palabras claves: aguas residuales, industria textil, MiPymes, tratamiento de aguas residuales para la búsqueda de artículos en Science Direct y Web of Science. Se utilizó además del protocolo de búsqueda presentado en la Tabla 1 el operador booleano AND y NOT, este último, para indicar la exclusión de aguas residuales domésticas.

Los periodos de revisión documental no se restringieron para el desarrollo del diagnóstico de la problemática y el marco teórico, sin embargo, la revisión de las metodologías de tratamiento se direccionó a no abarcar un periodo de análisis mayor a 5 años.

Tabla 1. Protocolo de búsqueda de la información

Protocolo de búsqueda de información	
Idioma	Español, inglés
Periodo de tiempo	2007-2023
Términos de búsqueda	Individuales Aguas residuales industriales, contaminantes, desarrollo económico, gestión ambiental, manufactura de textiles, MiPymes, tratamiento de aguas residuales Combinaciones
Recursos de información	I. Bases de datos: EBSCOhost, Science Direct, ProQuest, ISI Web of Knowledge, Dialnet, Redalyc II. Google académico III. Revistas indizadas en formato digital (ingeniería, agronomía); memorias de eventos académicos y específicos sobre sistemas de riego y manejo de imágenes IV. Páginas de redes sobre sistematización de experiencias V. Trabajos de investigación de posgrado
Estrategias	Formación Capacitación bases de datos, redes de conocimiento, OneNote, Mendeley
	Términos Palabras clave artículos, títulos, resúmenes
	Búsqueda I. Ingreso escalonado de términos, restringiendo la búsqueda según resultado precedentes II. Búsquedas booleanas (sencillas y por ecuaciones) III. Consulta a páginas personales de expertos IV. Revisión de citas y referencias bibliográficas
Normas	I. Diagnosticar la existencia de trabajos análogos II. Revisar las fuentes de información teniendo al horizonte de investigación III. Corroborar la correspondencia de la fecha de publicación de la fuente primaria IV. Corroborar y conseguir los trabajos completos, constatando su relevancia para la investigación V. Hacer lectura del resumen e introducción como estrategia de inclusión o exclusión preliminar VI. Hacer registro de comentarios acerca del estudio (relevancia, aspectos destacados o cualquier otro aspecto útil)
Criterios de Exclusión	I. Publicaciones que no contengan información de interés a pesar de contener los términos de búsqueda o la combinación de ellos II. Publicaciones relacionadas con experiencias, cuyos contextos son de electrónica o netamente matemáticos III. Publicaciones relacionadas con experiencias, cuyos diseños investigativos distan radicalmente del enfoque del problema
Estrategia de extracción	I. Representó el diseño del formato de revisión documental, el cual se estructuró en tres secciones II. Datos de diligenciamiento III. Datos descriptivos de la publicación y tópicos relevantes de la publicación

Fuente: adaptado a partir de Barbosa *et al.* (2013).

Tabla 2. *Ficha de revisión de documentos*

Datos de diligenciamiento	
Numeración del documento	
Fecha de diligenciamiento	
Datos descriptivos de la publicación	
Título de la publicación	Revisión documental:
Tipo de publicación	
Capítulo o páginas	
Datos de diligenciamiento	
Revista o editorial	
Fecha de publicación	
Título del estudio	
Autor/es	
Palabras clave	
Lugar de la investigación, si aplica	
Tópicos relevantes de la publicación	
Descripción general	Objetivos
	Justificación
Fundamentos teóricos	Descripción de las ecuaciones o principios que rigen la Investigación
Metodología	Descripción breve
Conclusiones	
Referentes	
Observaciones u opinión	
Calificación	alta-media-baja

Fuente: adaptado a partir de Barbosa *et al.* (2013).

4. Resultados

Las concentraciones promedio de parámetros de calidad del agua provenientes de los procesos del sector textil se muestran en la Tabla 3, estos son comparados con el límite admisible estipulado por la Resolución 631 de 2015 para vertimientos puntuales de agua superficial y sistemas de alcantarillado público.

Tabla 3. Parámetros promedio de las aguas residuales de la industria textil

Procesos	DBO (mg/L) O ₂	DQO (mg/L) O ₂	Sólidos suspendidos totales (SST, mg/L)	Aceites y grasas	Fenoles (µg/L)	Cromo	Sulfuros (µg/L)	Color (APHA)
Descrude de lana	2.270	7.030	3.310	580	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
Acabado de lana	170	590	60	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
Procesos poco intensivos en agua (hilado tejido, engomado, punzonado)	293	692	185	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
Teñido	170	1.908	499	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
Acabados de tejidos planos								
Simple	270	900	60	70	50	40	70	800
Complejo	350	1.060	110	45	55	110	100	N. D.
Complejo + desengomado	420	1.240	155	70	145	1.100	N. D.	N. D.
Acabado de tejidos de punto								
Simple	210	870	55	85	110	80	22	400
Complejo	270	790	60	50	100	80	150	750
Acabados de calcetines	320	1.370	80	100	60	80	560	490
Acabado de alfombras	180	1.190	65	20	130	30	180	490
Acabado de hilos	180	680	40	20	170	100	200	570
Límite admisible Resolución 631 de 2015	200	400	50	20	200	500	1.000	N. D.

Nota. N. D.: no detectado.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (1996), Savin y Butnaru (2008) y Resolución 631 de 2015, Art 13, citados por Cárdenas (2019).

Lo anterior permite evidenciar incumplimientos del límite admisible en parámetros como la DBO, la DQO, los SST, aceites y grasas, donde el descrude de lana y el proceso complejo de acabados de tejidos de punto son los más críticos, como lo indica FUNDES (2001), al referir que en sus vertimientos aportan una alta carga contaminante con cantidades considerables de detergentes, emulsionantes, secuestrantes, antiespumantes, solventes, suavizantes y productos engomantes. Teñidos, con vertimientos de colorantes, igualadores, dispersantes, antiespumantes, estabilizadores de pH y secuestrantes de dureza.

En adición, como resultado de un ejercicio práctico del presente artículo, se consolida en las Tablas 4, 5, 6 y 7, la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de tres empresas colombianas pertenecientes al sector textil.

Tabla 4. Resultados caracterización de aguas residuales empresas colombianas pertenecientes al sector textil

Parámetro	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Norma de comparación 1074/1997 y 1596/2001	Estado empresa 1	Estado empresa 2	Estado empresa 3
Cadmio (mg/L)	0,022	0,017	0,021	0,003	no cumple	no cumple	no cumple
Cromo total (mg/L)	0,068	0,01	0,069	1	cumple	cumple	—
DBO ₅ (mg/LO ₂)	233	408	512	1.000	cumple	cumple	cumple
DQO (mg/LO ₂)	854	1.000	577	2.000	cumple	cumple	cumple
Fenoles (mg/L)	N. D.	0,16	0,22	0,2	cumple	cumple	no cumple
Grasas y Aceites (mg/L)	19	27	28	100	Cumple	Cumple	Cumple
Plomo (mg/L)	0,117	—	0,189	0,1	No cumple	Cumple	No cumple
SST (mg/L)	112	—	38	800	Cumple	Cumple	Cumple
Sulfuros (mg/L)	0,1	—	*	*	*	*	*
Tensoactivos (SAAM) (mg/L)	0,638	—	0,305	20	cumple	—	cumple
Cobre (mg/L)	0,515	0,745	0,022	0,25	no cumple	no cumple	cumple

Nota. *La norma no tiene valor admisible para este parámetro.

— Falta de datos.

Fuente: elaboración propia con base en la norma de comparación Resolución 1074/1997 y 1596/2001, DAMA, versiones anteriores a la Resolución 631 de 2015.

Tabla 5. Resultados caracterización de aguas residuales (Empresa 1)

Hora	Temperatura (°C)	Sólidos sedimentables (mg/L)	pH unidades	Caudal (L/s)
12:40	33,3	< 0,5	8,51	5,34
13:10	26,7	—	7,37	1,263
13:40	24,6	< 0,5	6,91	8,04
14:10	24,1	—	6,38	3,92
14:40	23,1	—	6,50	0,797
Promedio	26,36	—	7,13	3,872
Norma Resolución 1074/1997 y 1596/2001 DAMA	< 30	2	5-9	*

Nota. *La norma no tiene valor admisible para este parámetro.

— Falta de datos

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados caracterización de aguas residuales (Empresa 2)

Hora	Temperatura (°C)	Sólidos sedimentables (mg/L)	pH unidades	Caudal (L/s)
13:30	37	< 0,5	10,31	3,642
14:00	35,4	—	10,23	3,403
14:30	37,1	< 0,5	9,44	3,007
15:00	39,7	—	9,97	3,595
15:30	33,9	—	10	5,617
Promedio	36,6	—	9,99	3,853
Norma Resolución 1074/1997 y 1596/2001 DAMA	< 30	2	5-9	*

Nota. *La norma no tiene valor admisible para este parámetro.

— Falta de datos.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultados caracterización de aguas residuales (Empresa 3)

Hora	Temperatura (°C)	Sólidos sedimentables (mg/L)	pH unidades	Caudal (L/s)
12:10	24,6	0,1	7,97	0,053
12:40	24	—	7,96	0,3668
13:10	24	< 0,5	7,91	2,445
13:40	24,2	—	7,76	4,353
14:10	24,6	—	7,82	3,205
Promedio	24,28	—	7,88	2,085
Norma Resolución 1074/1997 y 1596/2001 DAMA	< 30	2	5-9	*

Nota. *La norma no tiene valor admisible para este parámetro.

— Falta de datos.

Fuente: elaboración propia.

La primera empresa dedicada a la fabricación de telas cuenta con un proceso inicial de recepción de materias primas, seguido de lavado, triturado, secado y, finalmente, estampado. Emplea entre sus materias primas, tintes, colorantes, agua, hipoclorito de sodio, soda caustica, ácido acético y bisulfito de sodio. Como se señala en la Tabla 2, el cadmio, el plomo y el cobre superan el valor admisible.

Los efluentes de esta empresa provienen principalmente del área de lavado diario de telas y lavado de rodillos de impresión, los tintes usados generan la coloración del vertimiento y el aumento en la temperatura. El tratamiento previo a la descarga a la red matriz y el alcantarillado se compone de rejillas para retención de sólidos, tanques de sedimentación, tanque de aireación y torres de enfriamiento.

En la segunda empresa, se desarrolla el tejido y teñido de prendas de algodón, cuyo proceso inicial es la hilaza, continúa con un tejido circular, un teñido, secado y, finalmente, una compactación. Si bien la empresa cuenta con un tratamiento previo de torres de enfriamiento, neutralización y homogenización, incumplen la normatividad el plomo, el cobre, el pH y la temperatura (ver Tablas 2 y 4).

Por último, una tercera empresa incorpora dentro de sus procesos, la entrada inicial de materias primas, seguida de un cardado textil, manuales, mecheras, hiladoras, teñido, y el uso de una enconadora. Se registra el incumplimiento del cadmio, el plomo y fenoles. El tratamiento de los efluentes corresponde a la implementación de una trampa de grasas y sedimentación.

Como se observa, será importante que cada empresa realice un diagnóstico previo de las entradas y salidas de sus procesos, caracterización fisicoquímica de los efluentes e identificación de puntos críticos. Como resultado, se obtendrá un análisis particular a cada empresa. De las caracterizaciones presentadas con anterioridad, se identifican altas cargas contaminantes características por la presencia de fenoles, color, algunos metales, sólidos en suspensión y temperaturas superiores a los 30 °C.

Estas empresas emplean como sistema de tratamiento, rejillas de retención de sólidos, tanques de sedimentación, torres de enfriamiento, tanques de aireación y trampas de grasas; no obstante, se reconoce un incumplimiento en metales como el plomo, cobre y cadmio, provenientes principalmente de las etapas de tintura y acabados. Frente a ello, se recomienda implementar, por ejemplo, el uso de nanomateriales de titania, precipitación química, procesos electroquímicos, adsorción, intercambio iónico o procesos con membranas semipermeables.

En complemento, Kolluru *et al.* (2021) subrayan el incumplimiento de metales aparte del plomo, el hierro, níquel y cromo en aguas residuales de la industria textil, concentraciones comparadas con los límites máximos permisibles por la Organización Mundial de la Salud.

Tabla 8. Metales detectados y su concentración en una muestra de agua residual industrial

Industria	Hierro	Níquel	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Cromo	Arsénico	Manganeso	Mercurio
Galvanoplastia	127,5	106,1	3,02	4,94	97,57	167,6	72,34	58,03	N. D.	N. D.
Textil	0,39	0,13	N. D.	0,06	0,21	0,11	0,18	N. D.	N. D.	N. D.
Curtiembre	N. D.	N. D.	0,92	4,7	48,1	20,02	10	N. D.	N. D.	N. D.
Fundición	< 0,1	N. D.	60	< 1,0	< 0,5	152	N. D.	N. D.	170	N. D.
Automovilista	N. D.	2,04	6,09	2,91	14,50	19,38	0,46	N. D.	9,81	N. D.
Minería del cobre	292,6	N. D.	21,3	1,1	27,8	22,5	N. D.	N. D.	N. D.	7,5
Límites permisibles de la OMS	0,3	0,07	0,005	0,01	2	5	0,05	0,001	0,1	0,003

Nota. Concentraciones en mg/L.

N. D.: no detectado.

Fuente: Kolluru *et al.* (2021, p. 325).

Si bien, la vigente Resolución 631 de 2015, referente a los parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales, es más restrictiva que las versiones anteriores, específicamente en lo que se refiere al artículo 13, ítem de fabricación de productos textiles, los parámetros de níquel, cromo, cadmio y cobre se encuentran por encima frente a los valores máximos permisibles por la OMS, además se menciona que el hierro y el plomo no son incluidos en este ítem en particular.

Por otra parte, con relación al uso del recurso hídrico, en las cifras aportadas en la Tabla 9 por el DAMA (2004), se indica un mayor requerimiento de agua al interior del proceso de acabado de lana (667,2 L/kg), seguido por un valor de 557,1 L/kg, correspondiente al proceso de acabados de hilos en tejidos de punto y, finalmente, en el proceso complejo + desengomado (acabado de tejidos planos) se evidencia una demanda de agua de 507,9 L/kg.

Tabla 9. Consumo de agua en los principales procesos de la industria textil

Proceso/subproceso	Uso de agua (L/kg)		
	Máx.	Mín.	Med.
Descrude de lana	4,2	11,7	77,6
Acabado de lana	110,9	283,6	657,2
Procesos poco intensivos en agua (hilado, tejido, engomado, punzonado)	0,8	9,2	140,1
Acabado de tejidos planos			
Simple	12,5	78,4	275,2
Complejo	10,8	86,7	276,9
Complejo + desengomado	5	113,4	507,9
Acabado de tejidos de punto			
Simple	8,3	135,9	392,8
Complejo	20	83,4	377,8
Acabado de calcetines	5,8	69,2	289,4
Acabado de alfombras	8,3	46,7	162,6
Acabado de hilos	3,3	100,1	557,1

Fuente: U. S. EPA (1996, citado por DAMA, 2004).

En adición, Sentená-Montero (2018) cuantificó para el año 2018, en el sector textil-confección de Colombia, la huella hídrica, de acuerdo con Hoekstra *et al.* (2011), correspondiente a “un indicador del uso directo e indirecto de agua dulce por parte de un consumidor o de un productor, y que a su vez incluye la determinación de la huella hídrica azul, la huella hídrica verde y la huella hídrica gris”. El autor mencionado obtiene como resultado una huella hídrica azul (consumo del agua subterránea, superficial, evaporada y que no retorna a la misma fuente de su captura) por 26.714.302 m³ de agua, una demanda hídrica, uso y disposición final por el valor de 58.067.712 m³, una huella hídrica verde (considerando para su cálculo el volumen de agua requerida para producir una tonelada de algodón) por 45.583.761 m³/t, que contrasta con la huella hídrica verde del algodón importado en la india, de 984.173 m³ para el mismo periodo de análisis, y una huella hídrica gris considerando el análisis de tres metales pesados (cromo, níquel y zinc) utilizados en tintes y cloruros presentes en blanqueadores. Se requieren entonces para la ciudad de Bogotá, 224.000 L/día; Medellín, 127.000 L/día y Cali, 1.676.000 L/día, entendiendo estos valores como la cantidad de agua necesaria para diluir los contaminantes presentes en cumplimiento de la normatividad.

Del informe de sostenibilidad del sector sistema moda del año 2012, realizado por la Cámara de la Cadena Algodón, Fibras, Textil y Confecciones de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), la Asociación Colombiana de Industriales del Calzado, el Cuero y sus Manufacturas (Acicam) y el Programa de Transformación Productiva (PTP) indican como resultado de la evaluación de sus indicadores de desempeño ambiental, particularmente del recurso agua, un consumo de un 84 % para la sección operativa, frente a un 16 % para consumo administrativo. Asimismo, un consumo anual promedio de agua para empresas del sector textil y confecciones de 761.965 m³, que representa aproximadamente un 19 % de la capacidad de agua que puede contener el embalse de La Regadera (4 millones de metros cúbicos de capacidad según el Sistema de Información sobre Biodiversidad en Colombia (SIB, 2022) localizados en las estribaciones del páramo del Sumapaz, Cundinamarca).

Para la Acicam y el PTP, en promedio, el agua reciclada o reutilizada corresponde a un 13,6 % en empresas de textiles y confecciones y a un 0,07 % para cuero, calzado y marroquinería. A su vez, el 25 % de las empresas textiles no cuenta con tratamiento o gestión de sus aguas residuales (Acicam y PTP, 2012).

El volumen de agua utilizado por la industria manufacturera, de acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2020), fue de 278,1 millones de metros cúbicos, provenientes en un 60,7 % de agua superficial, 21,1 % de agua suministrada por empresas de acueducto, 15,1 % de agua subterránea, y un 3,0 % de agua lluvia, agua de mar y agua en carro tanque, donde la actividad industrial de textiles, confección, calzado y pieles registra un consumo de 11,7 millones de metros cúbicos.

Del total de establecimientos pertenecientes al dominio de actividades industriales, textil, confección, calzado y pieles, que suministraron información (1.172 establecimientos) a la Encuesta ambiental industrial (EAI) del año 2020, se menciona que 309 (26,4 %) de ellos cuentan con un programa de uso eficiente y ahorro de agua, por lo que se genera únicamente un aumento del 2,8 frente a lo registrado para el año 2019 (23,6 %). En relación con el agua residual generada (9.593.491 m³), 6.950.150 m³ son tratados y vertidos por parte del mismo establecimiento, y 831.522 m³ por terceros, es decir, que para el año 2020, el porcentaje de agua residual tratada coincide con un 81,81 % (DANE, 2020). Lo anterior permite suponer un panorama más crítico para las MiPymes, considerando que las cifras presentadas con anterioridad incluyen también en su análisis a grandes empresas.

Justamente, La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal, 2003) señala que:

Las Pyme corresponden al sector de las empresas más vulnerables en términos de su capacidad para enfrentar la creciente presión social, regulatoria y de fiscalización en materia ambiental, ya sea por la información escasa, o porque no cuentan con políticas definidas que les permitan desarrollar estrategias efectivas para la adecuación de sus procesos en función de la prevención de impactos ambientales. (p. 7)

Paralelamente, esta comisión indica que “la informalidad constituye una barrera a la demanda real de bienes y servicios ambientales. Especialmente en sectores como el de curtiembres en el cual se evidencia un alto nivel de informalidad” (Cepal, 2003, p. 28).

Se debe incluir, además, la crisis económica que ha enfrentado el sector textil en los últimos años por diversas causas, como la importación del mercado asiático (Cabrera, 2017), el contrabando técnico, prácticas como el dumping (vender por debajo del costo de producción), entre otras. Para la empresa de consultoría IARA Consulting Group (citada en El Espectador, 2018), el error principal de las compañías es que no conocen los factores que determinan su desempeño, y por eso fracasan. Por su parte, Confecámaras mencionó que la tasa de sobrevivencia de nuevos emprendimientos es del 34 % en los primeros cinco años de actividad, es decir, que de 100 empresas que se crean solo 34 sobreviven (Lozano, 2018).

En consecuencia, se hace relevante la implementación de acciones de mejora para las MiPymes, que permitan no solo su fortalecimiento económico sino también el mejoramiento de su desempeño ambiental.

Entre las iniciativas que contribuyen a la sostenibilidad ambiental del sector se encuentran documentos marco, como la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible de 2011, orientada a favorecer la integridad ambiental de los bienes y servicios, y estimular el uso sostenible de la biodiversidad, como fuentes de la competitividad empresarial y de la calidad de vida (Ministerio del Medio Ambiente, 1997); las Guías Ambientales: Buenas Prácticas de Producción Más Limpia para el sector PYME, y particularmente se cuenta con la Guía de Buenas Prácticas para el Sector textil del año 2012. Igualmente, para el caso de las MiPymes, se encuentra la NTC 6001:2008; y para la gran empresa, la ISO 9001, y certificaciones particulares de calidad que pueden adoptar las empresas de sector moda referenciadas en la guía 2: Certificaciones de calidad sistema moda, desarrollada por la entidad Colombia Productiva del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (Colombia Productiva, 2020).

Entre otras estrategias que garantizan la mejora continua del sector, se resalta planificar niveles de stocks adecuados con cosechas completas y de un mismo lugar o procedencia, planificar con los proveedores la sustitución de materias primas de origen químico utilizadas en los procesos de acabados, pretratamientos y tratamientos. FUNDES (2001) menciona, por ejemplo, el reemplazo de detergentes no biodegradables, la sustitución del ácido fórmico por ácido acético, entre otras sustituciones, que permiten la disminución de la carga contaminante en los efluentes para facilitar su tratamiento.

Como se observa, existen instrumentos y diferentes estrategias direccionadas hacia la sostenibilidad de la industria; sin embargo, los datos recopilados en el presente artículo de revisión revelan falencias en la gestión ambiental, altos consumos de agua y vertimientos con incumplimiento en los valores máximos permisibles. Además, se evidencia la falta de reportes y estudios con información actualizada de fácil acceso, que permita obtener un panorama transparente del sector. Esto obedece, entre otros aspectos, a dificultades de infraestructura física y acompañamiento integral en el diseño e implementación de prácticas y tecnologías de tratamiento.

Las necesidades de bienes y servicios ambientales se encrujecen a raíz de la informalidad de muchas empresas, a las que no se les realiza ningún tipo de control por parte de las autoridades ambientales. Además de ofrecer una buena calidad del producto, la entidad Colombia Productiva (2020) señala que ahora las organizaciones deben encontrarse orientadas a lograr procesos integrales de gestión de calidad con el entorno, que incluyan su impacto en el consumidor, el ambiente, la naturaleza, la generación de empleo digno y justo, innovación empresarial, productividad y sostenibilidad.

Ahora bien, a continuación, se presentan como resultado de la aplicación de la metodología de búsqueda propuesta por Barbosa *et al.* (2013), los artículos de mayor relevancia en torno al tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil.

De manera reiterada se encontró que procesos convencionales como la coagulación es eficiente para la remoción de coloides y sólidos suspendidos; por ejemplo, Jorfi *et al.* (2017) reportan que este tipo de contaminantes representan alrededor de 50 % de la DQO total de un efluente textil.

Si bien la coagulación es considerada como un método de tratamiento convencional, Daneshvar *et al.* (2006) señalan como su principal problema, la sensibilidad de los coagulantes a condiciones de pH y temperatura, donde se generan gastos frecuentes en la compra de insumos químicos. En consecuencia, se ha comenzado a utilizar la electricidad como medio para generarlos, que tiene entre sus ventajas, un mejor control de reactivos, equipos simples, menor volumen de lodos, y no se requiere de la adición de reactivos químicos adicionales.

De hecho, Ospina y Betancur (2016), de la Universidad Eafit de Colombia, evaluaron la viabilidad tecnológica del proceso acoplado de electrocoagulación y electro-oxidación, del cual obtuvieron que, en un tiempo de 30 minutos, la DQO se reduce en un 80,85 % y el 100 % para el color, empleando un consumo energético de 15,96 kWh/m³ y una producción de lodos de 0,882 kg/m³ con 20 % de humedad.

Por otro lado, Liu *et al.* (2012) utilizaron una síntesis de poliol para impregnar las nanopartículas de plata (Ag) sobre nanofibras de TiO₂ electrohiladas, para posteriormente fabricar una membrana de nanofibras de Ag/TiO₂, permitiendo la inactivación bacteriana del 99,9 % y una degradación del colorante azul de metileno del 80 % bajo la irradiación solar en 30 min., una mineralización completa después de 80 minutos analizando el carbono orgánico total (TOC). Resulta importante la eliminación de este colorante catiónico por la dificultad de su remoción, pues es empleado ampliamente en la industria textil para la tinción de fibras sintéticas.

Igualmente, la degradación de este colorante fue evaluada por Vallejo *et al.* (2018), de la Universidad del Atlántico, Colombia, bajo irradiación visible sobre electrodos de TiO₂ sensibilizados con pigmentos de clorofila, extraídos de la planta de *Spinacia oleracea*. El estudio finalmente indicó que, bajo radiación visible y en presencia de TiO₂, no hubo degradación significativa; sin embargo, el proceso de sensibilización de las películas de TiO₂ con el extracto de la planta *Spinacia oleracea* evidenció un efecto positivo en el proceso de fotodegradación bajo irradiación visible, alcanzado una degradación del 25 % después de 140 minutos. Para este mismo fin de degradación del azul de metileno, Contreras *et al.* (2018) emplearon la cepa de levadura *Galactomyces geotrichum* KL20A, aislada de muestras de kumis tradicionales, recogidas de un centro de producción en el Valle del Cauca (Colombia), con el fin de evaluar su capacidad de remoción. Se comprobó una alta capacidad para reducir la concentración de azul de metileno por acción de la levadura en condiciones anaerobias. Se verificó que la mayor tasa de remoción se obtiene a las 24 horas de exposición, después de este tiempo, y hasta las 48 horas se, tiene un valor máximo cercano al 70 %.

GilPavas *et al.* (2018), como resultado del tratamiento secuencial coagulación química (CQ), seguida de procesos avanzados de oxidación (PAO), Fenton (H₂O₂/Fe²⁺) o foto-Fenton (UV/H₂O₂/Fe²⁺), intensificados con radiación de ondas de ultrasonido (US) de baja frecuencia, a una muestra de agua de una empresa dedicada a la fabricación de pantalones, localizada en Medellín (Colombia), establecieron como condiciones óptimas del proceso US/H₂O₂/Fe²⁺ 1 mM de Fe²⁺, 14 mM de H₂O₂ y pH 3. En estas condiciones de operación, el proceso de CQ acoplado con el proceso US/H₂O₂/Fe²⁺ logra remover alrededor del 82 % de la DQO, en tanto que al acoplarlo con el proceso US/UV/H₂O₂/Fe²⁺, alcanza hasta un 95 % de eliminación en 90 min de reacción.

Ese mismo porcentaje del 95 %, para la eliminación de la DQO, también fue obtenido por GilPavas y Correa-Sánchez (2020), durante su evaluación del proceso secuencial de adsorción de carbón activado (CA) y un proceso de electrocoagulación (CE) para el tratamiento de aguas residuales industriales contaminadas con colorante índigo. El proceso optimizado de EC/AC condujo a un efluente que satisface las regulaciones colombianas. En condiciones óptimas (pH = 5,4, σ = 2 mS/cm, j = 14 mA/cm², y t = 11 min), lograron eliminaciones de color, DQO y TOC del 95 %, 63 % y 51-%, respectivamente. El índice de biodegradabilidad también aumentó de 0,13 a 0,29, mientras que las pruebas de toxicidad mostraron un valor restante del 45 %, eliminado por medio de un proceso de adsorción con el carbón activado.

La aplicabilidad reciente de la nanotecnología en el campo ambiental, para la remediación y el tratamiento de aguas, incluye mecanismos como la adsorción de metales y otros contaminantes.

Ghasemzadeh *et al.* (2014) desarrollaron una revisión en torno al uso de nanomateriales de titania, nanotubos de carbono (CNT), hierro cerovalente, dendrímeros y nanomateriales de plata, entre otros, aplicados en la actualidad para la recuperación ambiental y purificación del agua. Precisamente, las nanopartículas (NP) demuestran ser buenos adsorbentes de metales como Pb, Cd, Cu, Zn, y Ni con pH 8 (Engates; Shipley, 2011, p. 386), los nanotubos de carbono CNT son buenos absorbentes para el 1,2-diclorobenceno, trihalometanos, dioxinas, pireno, naftaleno, fenantreno y butano, entre otros compuestos orgánicos polares y no polares. Por su

parte, los metales cerivalentes en soluciones acuosas han demostrado que reducen numerosos contaminantes orgánicos, como alcanos y alquenos clorados, bencenos clorados, tintes orgánicos y nitroaromáticos en subproductos menos tóxicos (Ghasemzadeh *et al.*, 2014).

Zare *et al.* (2015) indican que, entre las diversas tecnologías para la eliminación de colorantes sintéticos se destaca el gran potencial de la adsorción. Adicional a ello, la funcionalización de los nanotubos de carbono (CNT) con la introducción de varios grupos funcionales (grupos hidroxilo y carbonilo mediante la oxidación) para la adsorción de colorantes sintéticos. En otro estudio realizado en China, Ji-Lai *et al.* (2009) sintetizaron un nanocompuesto magnético de nanotubo de carbono multipared y nanopartículas de óxido de hierro, del cual evidenciaron ventajas en la eliminación de colorantes catiónicos en soluciones acuosas en comparación con otros adsorbentes. Por ejemplo, los porcentajes de colorantes adsorbidos aumentaron a medida que la dosis de nanocompuesto se incrementó en el rango de 0,3 a 0,9 g/L. La razón de eliminación de colorantes aumentó de 30,1 a 99,16 %, de 17,11 a 98,33 % y de 17,6 a 98,8 % en azul de metileno, rojo neutro y azul de cresilo brillante, respectivamente.

El uso de materiales de desecho y minerales como buenos adsorbentes de bajo costo ha sido evaluado por diferentes autores, precisamente, Gupta *et al.* (2006) evaluaron la adsorción de dos colorantes azoicos, el naftol rojo -J y el naranja directo, sobre el mineral nontronita, y encontraron que la adsorción de los colorantes mejora con el aumento de la temperatura, y disminuye con el aumento del pH.

Mittal *et al.* (2005) utilizaron la soja desaceitada como material de desecho y adsorbente de bajo costo para la eliminación del tinte textil verde malaquita. En su experimento con diferentes concentraciones del colorante (1×10^{-5} al 1×10^{-4} M), un pH fijo de 5.0 y diferentes temperaturas (30, 40 y 50 °C), se menciona que la fase inicial de adsorción fue rápida: en media hora entre el 65 y el 70 % del colorante es adsorbido por la soja desaceitada a cada temperatura, y en casi 2 h eran suficientes para alcanzar el equilibrio.

Cueva-Orjuela *et al.* (2017), al considerar la oferta de caña de azúcar en Colombia y su composición, principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (adsorbentes potenciales), evaluaron la viabilidad del uso del bagazo de caña de azúcar para la adsorción del rojo básico 46 en solución acuosa. Obtuvieron una eliminación del 86,5 % y la optimización del sistema permitió alcanzar una adsorción máxima del 95 %.

Continuando en esta misma línea, avances recientes sobre el uso de residuos de biomasa como adsorbentes han sido recopilados por Shelke *et al.* (2022), se destacan altas eficiencias en la eliminación del colorante azul de metileno con resultados comparativamente iguales con el carbón activado. Al mismo tiempo, Vedula y Yadav (2022) evaluaron el uso de una membrana compuesta de lignina de quitosano para la remoción de colorante azul de metileno, obteniendo una eliminación del 95 %, con ventajas como la reutilización de hasta cinco veces las membranas. La reutilización de los materiales a través de múltiples ciclos de desorción y adsorción, con altas eficiencias en la eliminación de residuos de colorantes, igualmente fue resaltada por Tissera *et al.* (2020).

Kumbhar *et al.* (2022) determinaron que el uso de residuos de té para la síntesis de un compuesto magnético de Fe_3O_4 permite la eliminación del 98,7 % de colorante violeta cristalino en las siguientes condiciones: dosis de adsorción de 1,0 g/L tiempo de contacto de 90 min, una concentración inicial de colorante de 100 mg/L, y un pH inicial de 7 a 298 K.

Ouedrhiri *et al.* (2022) revelaron que el uso de biocarbón preparado a partir de semillas de dátiles podría considerarse como una opción prometedora de bajo costo para la adsorción de colorantes aniónicos de aguas residuales.

Joshi *et al.* (2022) determinaron que colorantes orgánicos son adsorbidos eficientemente por aerogeles a base de celulosa y grafeno, derivados de residuos de frutas (cáscaras de pomelo), con una eficiencia de

eliminación del 98 % y una capacidad de adsorción de colorante azul de metileno notablemente superior a materiales como el carbón activado, el grafeno, la celulosa y los materiales de base polimérica, incluidos sus aerogeles. Así mismo, los resultados señalan una adsorción más rápida y mayor de colorantes catiónicos, como azul de metileno (MB), verde malaquita (MG) y rodamina (6G, Rh6G), que, de aniónicos, como rosa de bengala (RB) y naranja de metilo (MO), impulsados por la interacción electrostática, en adición al reciclaje de los aerogeles a base de celulosa y grafeno para la eliminación adsorptiva de colorante azul de metileno durante seis ciclos consecutivos de adsorción-desorción.

En síntesis, se evidencia que se han implementado tratamientos para los efluentes de la industria textil, como la electrocoagulación y electro-oxidación acoplados, donde destaca una reducción de un 80,85 % de la DQO en 30 minutos y el 100 % para el color, procesos avanzados de oxidación (PAO), Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) o foto-Fenton ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) intensificados con radiación de ondas de ultrasonido (US) de baja frecuencia (reducciones de DQO de hasta un 95 % en 90 min. de reacción). Hay avances con relación al uso de nanomateriales para la eliminación, por ejemplo, del colorante azul de metileno a partir de la sensibilización de las películas de TiO_2 con el extracto de la planta *Spinacia oleracea* (degradaciones del 25 % después de 140 minutos), o de hasta un 70 % mediante la biorremediación de este colorante con levadura *Galactomyces geotrichum* KL20A aislada.

Además, destaca el uso de nanopartículas (NP), que demuestran ser buenos adsorbentes de metales como Pb, Cd, Cu, Zn, y Ni a un pH 8, así como distintos bioadsorbentes compuestos por residuos de biomasa y minerales que pueden ser empleados para el tratamiento de efluentes teñidos con colorantes sintéticos, estos últimos se presentan como una alternativa de bajo costo para las empresas que cuentan con menos capacidad financiera para realizar grandes inversiones.

5. Conclusiones

Los resultados de la investigación permitieron identificar que los avances tecnológicos en materia de tratamiento de aguas residuales han implementado alternativas de tratamiento, entre los cuales se destacan procesos combinados como la electrocoagulación y electro-oxidación, oxidación avanzada (fotocatálisis), y procesos de mineralización y degradación foto catalítica, que garantizan la transformación de contaminantes complejos en materiales orgánicos simples como CO_2 y H_2O .

Así mismo, se identificaron altos rendimientos en la eliminación de parámetros como la DQO, la DBO y el color. Adicional a ello, se resalta el uso de nanomateriales de Titania como buenos adsorbentes de metales como Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, y como alternativa de bajo costo, el uso de materiales de desecho y minerales como buenos adsorbentes de colorantes, con la posibilidad de su reutilización con altas eficiencias en varios ciclos.

No obstante, se hace hincapié en que estos no son los únicos parámetros que se encuentran en las aguas residuales provenientes de la industria textil, por lo cual, es fundamental la caracterización previa de los efluentes de cada empresa en particular, identificando la mayor cantidad de parámetros que pudiesen ocasionar afectaciones, no solo al ambiente, sino también en la salud humana.

En este contexto, se resalta que las micro, pequeñas y medianas empresas poseen dificultades en torno a infraestructura física y acompañamiento integral en el diseño e implementación de prácticas y tecnologías de tratamiento. La misma Cepal reconoce que las Pyme corresponden al sector de las empresas más vulnerables en términos de su capacidad para enfrentar la creciente presión social, regulatoria y de fiscalización en materia ambiental, con necesidades de bienes y servicios ambientales que se encrudecen a raíz de la informalidad de muchas empresas, a las que, por ende, no se les realiza ningún tipo de control por parte de las autoridades ambientales.

Los esfuerzos realizados no son suficientes, y es limitada su cobertura. Como consecuencia, se evidencia falta de acompañamiento e identificación de las necesidades reales, acordes al mercado del sector, y desafíos en materia ambiental, lo que se traduce en información escasa con relación a datos del desempeño ambiental de las MiPymes, y ausencia de políticas y estrategias efectivas que permitan la adecuación y optimización de sus procesos a cortos y medianos plazos.

En línea con lo anterior, se menciona que el tema ambiental para las industrias ha sido de reserva, para evitar sanciones y la imposición de extensivos requerimientos, lo cual ha dificultado conocer su estado actual. Se deberá, entonces, realizar una transición hacia lograr, entre otras cosas, una digitalización de productos y procesos, e intercambios de información a través de plataformas compartidas.

Existen políticas como el Sistema Nacional de Apoyo a MiPymes, en el cual se establece la gran responsabilidad del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible; incentivos por parte del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, la Cámara de Comercio de Bogotá y la Unión Europea en el desarrollo de proyectos en materia de productividad y competitividad, que buscan la transición de este sector a modelos de negocios sociales, ambientales y económicamente sostenibles. Además, está el apoyo de agremiaciones como el SENA, Inexmoda, la ANDI y ProColombia, entre otras, donde se promueve la financiación de proyectos científicos, tecnológicos y de innovación.

Si bien el reto que se debe enfrentar es exigente, los esfuerzos realizados han traído avances importantes en la implementación y recuperación de residuos (circularidad en los procesos de fabricación textil), optimización de procesos en torno a eficiencia energética y de recursos, producción textil a partir de materias primas renovables y recicladas, y materias primas de fuentes naturales. Se menciona, por ejemplo, la gran expectativa en el cáñamo, porque, entre otras cosas, se requiere menos agua y menos insumos químicos para su producción, en comparación con materiales como el algodón. Para muchas empresas, estas transiciones y apuestas hacia negocios más responsables con el ambiente se realizan lentamente, con metas a largo plazo; sin embargo, se resalta la importancia de no escatimar en esfuerzos para plantear metas más ambiciosas, pues la provisión y calidad de los recursos naturales se encuentran en un estado crítico.

Será necesario seguir trabajando y realizando acompañamientos continuos e integrales por parte de las autoridades, con mayores coberturas de los programas productivos y sostenibles. El sector textil requiere la adopción de buenas prácticas ambientales, orientadas principalmente a la prevención, con inversiones en la implementación de sistemas de tratamiento, para lo que será necesario el uso de una o más unidades de tratamiento.

Referencias

- Asociación Bancaria y de Entidades Financieras de Colombia (2019). *Riesgos ambientales y sociales en el sector textil*. https://www.asobancaria.com/wp-content/uploads/2022/08/Asobancaria_Informe_Sostenibilidad_2019.pdf
- Asociación Colombiana de Industriales del Calzado, el Cuero y sus Manufacturas y Programa de Transformación Productiva (2012). *Informe de sostenibilidad 2012: Sector Sistema Moda*. <https://www.colombiaproductiva.com/ptpcapacita/publicaciones/sectoriales/publicaciones-sistema-moda/informe-de-sostenibilidad-sistema-moda-2012>
- Asociación Nacional de Instituciones Financieras (2021). *Retos y oportunidades de las Pymes*. <https://www.anif.com.co/comentarios-economicos-del-dia/retos-y-oportunidades-de-las-pymes/>

- Almansba, Almira; Kane, Abdoulaye; Nasrallah, Noureddine; Maachi, Rachida; Lamaa, Lina; Peruchon, Laure; Brochier, Cedric; Béchohra, Imane; Amrane, Abdeltif; Assadi, Aymen (2021). Innovative photocatalytic luminous textiles optimized towards water treatment: Performance evaluation of photoreactors. *Chemical Engineering Journal*, 416, 129195.
<https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.129195>
- Barbosa, Jorge; Barbosa, Juan; Rodríguez, Margarita (2013). Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de sistematización de experiencias educativas. *Investigación Bibliotecológica*, 27(6), 83-105.
[https://doi.org/10.1016/S0187-358X\(13\)72555-3](https://doi.org/10.1016/S0187-358X(13)72555-3)
- Cabrera, Mauricio (2017, 21 de agosto). La crisis del sector textil. *Portafolio*
<https://www.portafolio.co/opinion/mauricio-cabrera-galvis/la-tesis-del-sector-textil-analisis-508883>
- Cárdenas, Héctor (2019). *Riesgos Ambientales y Sociales en el sector textil: Pilotos de innovación financiera negocios verdes*.
https://pdf.zbook.org/dl/zbook_riesgos-20ambientales-20y-20so_58ad64.pdf
- Colombia Productiva (2020). *Certificaciones internacionales de calidad para el sistema moda*.
<https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/style-thats-sustainable-a-new-fast-fashion-formula>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2003). *Necesidades de bienes y servicios ambientales de las pymes en Colombia: identificación y diagnóstico*.
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/5767-necesidades-bienes-servicios-ambientales-pyme-colombia-identificacion-diagnostico>
- Contreras, Margarita; Vallejo, William; Chaves, Clemencia; Grande, Carlos (2018). *Estudio del Efecto de la Temperatura Sobre el Proceso de Biorremoción del Colorante Azul de Metileno Utilizando Galactomyces geotrichum KL20A*.
http://www.advancesincleanerproduction.net/7th/files/sessoes/6A/3/contreras_mercado_et_al_academic.pdf
- Corporación Financiera Internacional (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de textiles*.
<https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/344ae0b8-1f23-45dc-88cf-9f2cf8e8b434/0000199659ESes%2BTextiles%2BManufacturing%2Brev%2Bcc.pdf?MOD=AJPERES&CVID=nPtjHpr>
- Cueva-Orjuela, Juan; Hormaza-Anaguano, Angelina; Merino-Restrepo, Andrés (2017). Sugarcane bagasse and its potential use for the textile effluent treatment. *DYNA*, 84(203), 291-297.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.61723>
- Daneshvar, Nezam; Oladegaragoze, Ali; Djafarzadeh, Nader (2006). Decoloración de soluciones de colorantes básicos por electrocoagulación: una investigación del efecto de los parámetros operativos. *Hazardous Materials*, 129(1-3), 116-122.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.033>
- Day, April (2019). *World Water Demand Will Increase 55 % by 2050. Save The Water*.
<https://savethewater.org/water-demand-to-increase-55-globally-by-2050/>

- Departamento Administrativo de la Función Pública (2015). Decreto 1076 de 2015. *Por medio del cual se expide el Decreto único reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (2020). *Encuesta Ambiental Industrial (EAI)*.
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/EAI/2020/bol_EAI_2020.pdf
- Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (2004). *Guía ambiental para el sector textil*.
<https://oab.ambientebogota.gov.co/descargar/4338/>
- Departamento Administrativo de Medio Ambiente (1997). Resolución 1074 de 1997. *Por medio del cual se establecen estándares ambientales en materia de vertimientos*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=974>
- Departamento Administrativo de Medio Ambiente (2001). Resolución 1596 de 2001. *Por medio del cual se modifica la Resolución 1074 de 1997*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=20659>
- El Espectador (2018, 29 de octubre). ¿Por qué el 70 % de las empresas en Colombia fracasan en los primeros cinco años? *El Espectador*.
<https://www.elespectador.com/economia/por-que-el-70-de-las-empresas-en-colombia-fracasan-en-los-primeros-cinco-anos-article-820897/>
- Engates, Karen; Shipley, Heather (2011). Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: effect of particle size, solid concentration, and exhaustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 386-395.
<https://doi.org/10.1007/s11356-010-0382-3>
- Fundación Suiza para el Desarrollo Sostenible en América Latina (2001). *Guía de buenas prácticas para el sector textiles*.
<https://justiciaambientalcolombia.org/wp-content/uploads/2012/09/guc3ada-buenas-prc3a1cticas-textiles.pdf>
- Ghasemzadeh, Gholamreza; Momenpour, Mahdiye; Omidi, Fakhriye; Hosseini, Mohammad; Ahani, Monireh; Barzegari, Abolfazl (2014). Applications of nanomaterials in water treatment and environmental remediation. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 8(4),471-482.
<https://doi.org/10.1007/s11783-014-0654-0>
- GilPavas, Edison; Arbeláez-Castaño, Paula; Medina-Arroyave, José; Gómez-Atehortúa, Carlos (2018). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia. *Revista internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1),157-167.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>
- GilPavas, Edison; Correa-Sánchez, Santiago (2020). Assessment of the optimized treatment of indigo-polluted industrial textile wastewater by a sequential electrocoagulation-activated carbon adsorption process. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101306.
<https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101306>

- Gomes, Luana; Miranda, Felipe; Días, Maria (2022). Sustainable practices in slow and fast fashion stores: What does the customer perceive? *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100413>
- Gupta, Vinod; Mohan, Dinesh; Saini, Vipin (2006). Studies on the interaction of some azo dyes (naphthol red-J and direct orange) with nontronite mineral. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(1),79-86.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.11.041>
- Hoekstra, Arjen; Chapagain, Ashok; Aldaya, Maite; Mekonnen, Mesfin (2011). *Manual de evaluación de la huella hídrica Establecimiento del estándar mundial*. Water Footprint Network.
https://waterfootprint.org/media/downloads/Water_Footprint_Assessment_Manual_Spanish.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2017). *Informe Nacional del Registro Único Ambiental Manufacturero*.
https://www.andi.com.co/Uploads/Informe_RUAMF_2017_636840144908529345.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2019). *Estudio Nacional del Agua*.
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua#>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2015). Norma ISO 9001. *Para Sistemas de Gestión de Calidad*.
<https://www.isotools.us/normas/calidad/iso-9001/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2008). *Certificación NTC 6001, Modelo de Gestión para la pequeña y mediana empresa*.
https://www.icontec.org/eval_conformidad/certificacion-ntc-6001-modelo-de-gestion-para-la-pequena-y-mediana-empresa/
- Ji-Lai, Gong; Bin, Wang; Guang-Ming, Zeng; Chun-Ping, Yang; Cheng-Gang, Niu; Qiu-Ya, Niu; Yi, Liang (2009). Removal of cationic dyes from aqueous solution using magnetic multi-wall carbon nanotube nanocomposite as adsorbent. *Hazardous Materials*, 164(2-3),1517-1522.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.072>
- Jorfi, Sahand; Barzegar, Gelavizh; Ahmadi, Mehdi; Darvishi, Reza; Jafarzadeh, Nemat; Takdastan, Afshin; Saeedi, Reza; Abtahi, Mehrnoosh (2017). Enhanced coagulation-photocatalytic treatment of Acid red 73 dye and real textile wastewater using UVA/Synthesized MgO nanoparticles. *Journal of Environmental Management*, 177,111-118.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.005>
- Joshi, Pratiksha; Sharma, Om; Ganguly, Sudip; Srivastava, Manoj; Khatri, Om (2022). Fruit waste-derived cellulose and graphene-based aerogels: Plausible adsorption pathways for fast and efficient removal of organic dyes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 608(3), 2870-2883.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.016>
- Kolluru, Samyuktha; Agarwal, Shreya; Sireesha, Sadamanti; Sreedhar, Inkollu; Kale, Samir (2021). Heavy metal removal from wastewater using nanomaterials-process and engineering aspects. *Process Safety and Environmental Protection*, 150, 323-355.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.025>

- Kumbhar, Pramod; Narale, Dattatray; Bhosale, Rakhlee; Jambhale, Chitra; Kim, Jin-Hyeok; Kolekar, Sanjay (2022). Synthesis of tea waste/Fe₃O₄ magnetic composite (TWMC) for efficient adsorption of crystal violet dye: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107893>
- Liu, Lei; Liu, Zhaoyang; Bai, Hongwei; Sun, Darren (2012). Concurrent filtration and solar photocatalytic disinfection/degradation using high-performance Ag/TiO₂ nanofiber membrane. *Water Research*, 46(4), 1101-1112.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.009>
- Lozano, Rolando (2018, 13 de diciembre). En alza, el índice de supervivencia de las empresas en el país. *El Tiempo*.
<https://www.eltiempo.com/economia/empresas/la-tasa-de-supervivencia-de-empresas-en-colombia-305066>
- Ministerio del Medio Ambiente (1997). *Política Nacional de Producción más Limpia*.
<https://justiciaambientalcolombia.org/wp-content/uploads/2012/09/polc3adtica-nacional-de-producccic3b3n-mc3a1s-limpia2.pdf>
- Mittal, Alok; Krishnan, Lisha; Gupta, Vinod (2005). Removal and recovery of malachite green from wastewater using an agricultural waste material, de-oiled soya. *Separation and Purification Technology*, 43(2), 125-133.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.10.010>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Resolución 631 de 2015. *Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*.
<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>
- Niinimäki, Kirsi; Peters, Greg; Dahlbo, Helena; Perry, Patsy; Rissanen, Timo; Gwilt, Alison (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 189-200.
<https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>
- Organización de las Naciones Unidas (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>
- Organización de las Naciones Unidas (2022). *Naciones Unidas Colombia*.
<https://colombia.un.org/es/sdgs>
- Ossa, Guillermo (2018, 23 de enero). Colombiatex 2018 pinta cifras positivas para el sector textil. *El Tiempo*.
<https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/colombiatex-2018-pinta-cifras-positivas-para-el-sector-textil-174308>
- Ospina, Natalia; Betancur, Steven (2016). *Tratamiento de aguas residuales del sector textil mediante proceso acoplado electro-coagulación-electro-oxidación* [Tesis de pregrado]. Universidad EAFIT.
- Ouedrhiri, Abdessamad; Himii, Mohammed; Youbi, Boubaker; Lghazi, Youssef; Bahar, Jihane; El Haimer, Chaimaa; Aynaou, Aziz; Bimaghra, Itto (2022). Biochar material derived from natural waste with superior dye adsorption performance. *Materials Today: Proceedings*, 298(1), 79-86.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.928>

- Presidencia de la República (2019). Decreto 957 de 2019. *Por el cual se adiciona el capítulo 13 al Título 1 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1074 de 2015, Decreto Único del Sector Comercio, Industria y Turismo y se reglamenta el artículo 2º de la Ley 590 de 2000, modificado por el artículo 43 de la Ley 1450 de 2011.*
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=94550>
- Salazar, Daniel (2021). *Sector textil colombiano, de los años dorados al declive que expuso la pandemia.* Bloomberg Línea.
<https://www.bloomberglinea.com/2021/09/20/sector-textil-colombiano-de-los-anos-dorados-al-declive-que-expuso-la-pandemia/>
- Sentená-Montero, María (2018). *Huella Ecológica del sector Textil-Confección en Colombia* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana.
- Sistema de Información sobre Biodiversidad en Colombia (2022). *Flora de los Parques Ecológicos Distritales de Humedal de Bogotá, D.C.*
https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=sda_flora&request_locale=ru
- Shelke, Bharat; Jopale, Manohar; Kategaonkar, Amol (2022). Exploration of biomass waste as low-cost adsorbents for removal of methylene blue dye: A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(7), 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100530>
- Tissera, Nadeeka; Wijesena, Ruchira; Yasasri, Harini; de Silva, Nalin; de Silva, Rohini (2020). Fibrous keratin protein bio micro structure for efficient removal of hazardous dye waste from water: Surface charge mediated interfaces for multiple adsorption desorption cycles. *Materials Chemistry and Physics*, 246(1), 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122790>
- Vallejo, William; Díaz, Carlos; Alvis, María; Cantillo, Álvaro; Fajardo, Catalina (2018). Degradación de azul de metileno bajo irradiación visible sobre electrodos de TiO₂ sensibilizados con pigmentos de clorofila. *Prospectiva*, 16(2), 7-12.
<https://doi.org/10.15665/rp.v16i2.1455>
- Vedula, Shivani; Yadav, Ganapati (2022). Wastewater treatment containing methylene blue dye as pollutant using adsorption by chitosan lignin membrane: Development of membrane, characterization, and kinetics of adsorption. *Indian Chemical Society*, 99(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100263>
- Zafar, Zulakha; Fatima, Rida; Kim, Jong-Oh (2021). Water matrix effect, Photocatalytic degradation, Textile wastewater, Fe-TiO₂nanotubes. *Applied Catalysis B: Environmental Research*, 197, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111120>
- Zare, Karim; Gupta, Vinod; Moradi, Omid; Makhlof, Abdel; Sillanpää, Mika; Nadagouda, Mallikarjuna; Sadegh, Hamidreza; Shahryari-Ghoshekandi, Ramin; Pal, Angshuman; Wang, Zhou-Jun; Tyagi, Inderjeet; Kazemi, Maryam (2015). A comparative study on the basis of adsorption capacity between CNTs and activated carbon as adsorbents for removal of noxious synthetic dyes: a review. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 5, 227-236.
<https://doi.org/10.1007/s40097-015-0158-x>