

REVISIÓN DEL ESTADO DE AVANCE DE LAS APLICACIONES DE LA
NANOTECNOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES PRESENTES EN
LOS VERTIMIENTOS DE LA INDUSTRIA TEXTIL

NICOLÁS GUZMÁN GAMBOA

PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL

DIRECTOR

OSCAR LIBARDO LOMBANA CHARFUELAN

MSc., IQ.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. septiembre de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macias Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	11
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos	11
2. AGUAS RESIDUALES	12
2.1 Generalidades en el tratamiento de aguas residuales	12
2.2 Contaminantes presentes en las aguas residuales	15
2.3 Caracterización de las aguas residuales industriales	17
2.4 Métodos de tratamiento de aguas residuales en la actualidad	22
3. NANOTECNOLOGÍA	25
3.1 Características de los efluentes provenientes de la industria textil	25
3.1.1 <i>Proceso Húmedo de textiles</i>	27
3.1.2 <i>Encolado y desencolado</i>	29
3.1.3 <i>Descrude</i>	29
3.1.4 <i>Blanqueamiento</i>	30
3.1.5 <i>Mercerización</i>	30
3.1.6 <i>Tintura</i>	31
3.1.7 <i>Estampado</i>	31
3.1.8 <i>Refinamiento</i>	32
3.1.9 <i>Impacto ambiental de los efluentes generados por la industria textil</i>	32
3.2 Comparación de los tratamientos de agua residual empleados por industrias textiles con otras industrias	34
3.2.1 <i>Métodos de tratamientos de agua residuales empleados en la industria textil</i>	34
3.2.2 <i>Comparación de los tratamientos de aguas residuales entre la industria textil y otras industrias</i>	40
4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE NANOTECNOLOGÍA	42
4.1 Estado de la nanotecnología en la actualidad	42
4.2 Rol de la nanotecnología en el tratamiento de aguas residuales	45
4.3 Ventajas que aporta la nanotecnología en el tratamiento de aguas	49

4.4 Clasificación de distintas técnicas que involucran la nanotecnología en el tratamiento de aguas residuales industriales	52
4.4.1 <i>Tecnologías para remediación de aguas</i>	54
4.4.2 <i>Tecnologías usadas para tratamiento de aguas</i>	56
4.4.3 <i>Tecnologías usadas para filtración de aguas residuales</i>	60
4.4.4 <i>Otros acercamientos de la nanotecnología</i>	63
4.5 Variables críticas para el tratamiento de aguas residuales por medio de nanotecnologías aplicables	64
4.6 Secuencia de tratamiento de aguas residuales en el sector textil mediante técnicas con nanotecnología aplicada	67
5. CONCLUSIONES	73
6. RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFIA	76
ANEXOS	85
ANEXO 1. Matriz PUGH	86

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Efectos adversos de los contaminantes desechados en aguas residuales para la flora y fauna.	13
Figura 2. Tipos de tratamiento de aguas residuales.	15
Figura 3. Representación esquemática de contaminantes en el agua.	16
Figura 4. Características y variables presentes en aguas residuales.	21
Figura 5. Limitaciones clave de algunos métodos de tratamiento de aguas por medios convencionales.	23
Figura 6. Diagrama de flujo de las distintas etapas involucradas en la industria textil.	26
Figura 7. Procesamiento en húmedo de textiles y generación de aguas residuales.	27
Figura 8 Productos químicos no convencionales ecológicos para el procesamiento húmedo de textiles.	28
Figura 9. Cuadro comparativo entre industria textil y distintas industrias.	40
Figura 10. Resumen métodos Top-Down fase sólida.	44
Figura 11. Resumen métodos Bottom-Up.	44
Figura 12. Ilustraciones de los nanomateriales que pueden ser usados en el tratamiento de aguas residuales.	46
Figura 13. Aplicaciones de distintos nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales.	47
Figura 14. Papel de los nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales.	48
Figura 15. Potencial de nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales y su reutilización.	51
Figura 16. Esquema de calificaciones de la nanotecnología empleada en el tratamiento de aguas.	53
Figura 17. Comparación de remoción de distintos tintes por medio de nanotubos de carbono (CNTs), junto a azul de metileno, Cd (II) y Pd (II) mediante el uso de distintos nanomateriales.	54
Figura 18: Procesos innovadores para el tratamiento y recuperación de aguas residuales	56
Figura 19. Fotocatálisis realizada en la superficie de un nanocatalizador semiconductor.	58
Figura 20. Métodos de tratamiento de aguas residuales en los cuales se pueden emplear nanocatalizadores.	59
Figura 21. Nanotecnologías creadas por instituciones mundiales aplicadas a la filtración con nanomateriales.	61
Figura 22. Gráfica de mecanismos de remoción de contaminantes empleando nanotecnología	61
Figura 23. Mecanismos de actividad antimicrobial perteneciente a los nanomateriales.	64
Figura 24. Proceso genérico de la industria textil	68

RESUMEN

El presente documento busca estudiar el estado actual del avance de la nanotecnología que puede participar y optimizar el tratamiento de aguas residuales, más específicamente aquellos vertimientos y efluentes que provienen de la industria textil. Ya que la industria textil en Colombia es una de las más distintivas y tradicionales, estando presente por una historia más de 100 años, en los cuales han prevalecido aspectos importantes de esta como la creación de diversidad de empresas representativas internacionalmente, planes gubernamentales para el sector, ingenio en diversos ámbitos como la academia, inserción en programas de innovación productiva e instauración de un sector de clase mundial. A su vez, en busca de conocer la forma en la que la nanotecnología puede aportar a esta industria, se realizó un estudio de las distintas variables que afectan a estos efluentes, con el objetivo de seleccionar aquellas que representan mayor importancia al momento de seleccionar un método de tratamiento de aguas óptimo.

Palabras claves: Nanotecnología, Tratamiento de aguas residuales, industria textil.

INTRODUCCIÓN

Las personas del mundo en la actualidad han empezado a solicitar una gran cantidad de agua, tanto potable como funcional, para poder sobrellevar el estilo de vida que distintos seres humanos de diferentes partes del mundo llevan en la cotidianidad. Al igual que, con el paso del tiempo, la contaminación se ha convertido en uno de los mayores problemas que afectan la salud en el día a día, según WHO, la organización mundial de la salud según sus siglas en inglés, un mayor número de personas fallecen por la contaminación en comparación a casos de guerra y enfrentamientos violentos, siendo aproximadamente 9 millones de personas por año (Tahir et al., 2020, p. 1). Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales actuales constan de sistemas conformados por diferentes etapas de procesamiento (con costos elevados) cuyo propósito es el tratamiento, éstas procuran particularmente la remoción de distintos contaminantes específicos que pueden presentarse en aguas residuales, los cuales pueden estar constituidos por pequeñas cantidades de químicos industriales, desechos biológicos, desde microorganismos y trazas de metales pesados; que poseen el potencial de generar varias preocupaciones con respecto a los efectos adversos a la salud, tanto humana o de animales, al igual que en la flora del planeta (Anand et al., 2020, p. 70). A su vez se pretende presentar las ventajas que estas aplicaciones poseen, permitiendo dar posibles soluciones a la problemática de costos elevados y baja eficiencia de los tratamientos de aguas residuales convencionales, buscando generar con esto un proceso de economía circular (Albukhari et al., 2019, p. 549).

El sector textil ha experimentado una modernización en los últimos años, en los cuales se introdujeron una variedad de fibras y mezclas además de las fibras tradicionales (algodón, sintéticos y lana). Las últimas innovaciones incluyen nueva maquinaria que maneja más tejido y conserva el agua. Por lo tanto, la calidad y cantidad de los tintes y pigmentos de color varían considerablemente. Estas industrias textiles producen una gran cantidad de efluentes coloreados. A nivel mundial, las leyes ambientales obligan a que las aguas residuales de tinte se decoloren antes de su descarga. La liberación de tintes de la industria textil en los arroyos y ríos naturales plantea serios problemas para la vida marina del medio ambiente. Incluso después de los procedimientos previos, primarios y secundarios, las aguas residuales de la industria textil aún contienen colorantes y contaminantes disueltos que no pueden eliminarse mediante técnicas tradicionales, incluidos métodos químicos y biológicos. Los procesos de tratamiento de pulido

terciario como la adsorción son muy efectivos entre los diversos métodos de tratamiento avanzados (Niraj S. Topare, 2021).

La mayoría de los tintes presentes en los efluentes de la industria textil están diseñados para resistir la degradación y son químicamente inertes. Hay una gran cantidad de métodos utilizados en el tratamiento de aguas residuales de tintes, incluidos los procesos químicos, físicos y biológicos. El proceso de oxidación avanzada (AOP) con o sin el uso de catalizadores es una de las tecnologías emergentes que son capaces de convertir los contaminantes orgánicos en productos inocuos, la oxidación química (utilizando agentes como el ozono, el peróxido de hidrógeno y el cloro) a menudo muestra resultados satisfactorios, pero costos relativamente altos. Otro método de tratamiento eficiente de la energía del tratamiento del tinte es la aplicación de catálisis asociada a microondas para la degradación de compuestos orgánicos. La adsorción física, por ejemplo, la adsorción de carbón activado y la separación de membranas también se utilizan en la purificación de aguas residuales de tintes, y la reutilización de adsorbentes y el ensuciamiento de membranas siguen siendo un desafío. Los colorantes que se presentan con estructuras aromáticas complejas no se pueden degradar de manera efectiva con los métodos de tratamiento biológico convencionales (Runlin Han, 2020).

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Revisar el estado de avance tecnológico de las aplicaciones de la nanotecnología para la reducción de contaminantes presentes en los vertimientos del sector textil.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar el estado del arte de la nanotecnología para el tratamiento de aguas residuales industriales.
- Establecer las variables críticas a considerar en el tratamiento de las aguas residuales provenientes del sector textil.
- Determinar la aplicación de nanotecnología que permita la reducción de contaminantes presentes en vertimientos del sector textil en el contexto regional.

2. AGUAS RESIDUALES

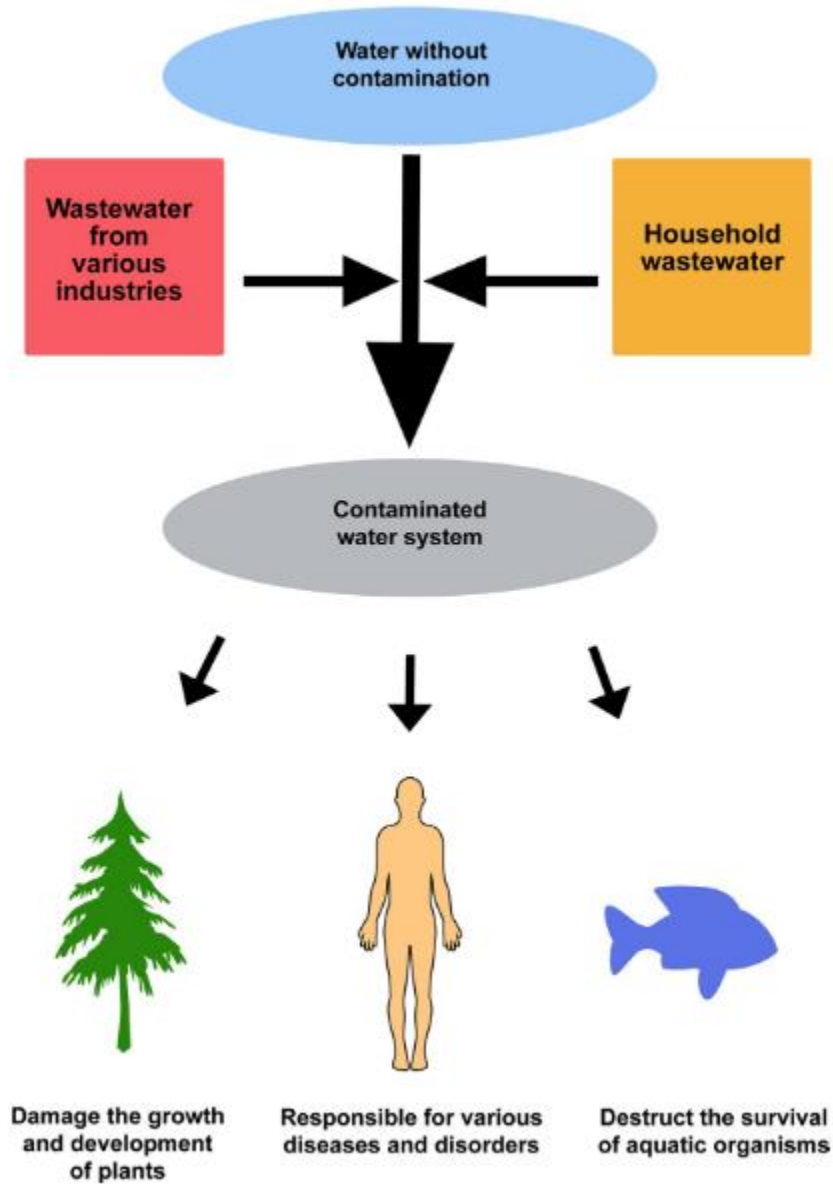
Con el paso de los años se observa un aumento sustancial en el número de habitantes en todo el mundo, esto lleva consigo un efecto directamente proporcional con respecto a los recursos naturales, los cuales deberán ser consumidos para garantizar, a todos los individuos, una calidad de vida adecuada. El más importante de estos recursos es el agua, debido al papel fundamental que presenta para la supervivencia del ser humano, presentándose como uno de los derechos fundamentales de la vida. Siendo más específicos, en el caso que se busca estudiar, diversos departamentos colombianos sufren de desabastecimiento de agua en intervalos muy cotidianos de su día a día, por lo cual es de vital importancia encontrar herramientas para hacer frente a esta problemática.

2.1 Generalidades en el tratamiento de aguas residuales

Con el paso del tiempo la escasez de agua es un problema con mayor relevancia, posibles motivos de esto pueden ser la falta de fuentes de agua fresca en el mundo, sequias prolongadas, protocolos de salud estrictos, incremento exponencial de la población y los diversos desafíos que presenta la demanda de agua con fines industriales o domésticos (Choksumlitpol et al., 2017; Deshpande et al., 2020). De todos los posibles motivos previamente presentados el más relevante son los desechos provenientes de procesos industriales, siendo responsables de un alto volumen de varios contaminantes, entre los cuales se pueden presentar tintes, microorganismos y metales pesados, desechados cada día; siendo los métodos de tratamiento utilizados tradicionalmente presentes en países en desarrollo los que cargan mayor responsabilidad de esta situación, ya que, para empresas de menor escala es muy costoso adoptar las tecnologías adecuadas debido al manejo de márgenes de ganancias muy estrechos, por lo cual se evaden leyes de seguridad ambiental, a su vez, que se manejan estándares de calidad bajos para los productos obtenidos (Paulkumar et al., 2021, p. 437).

Figura 1.

Efectos adversos de los contaminantes desechados en aguas residuales para la flora y fauna.



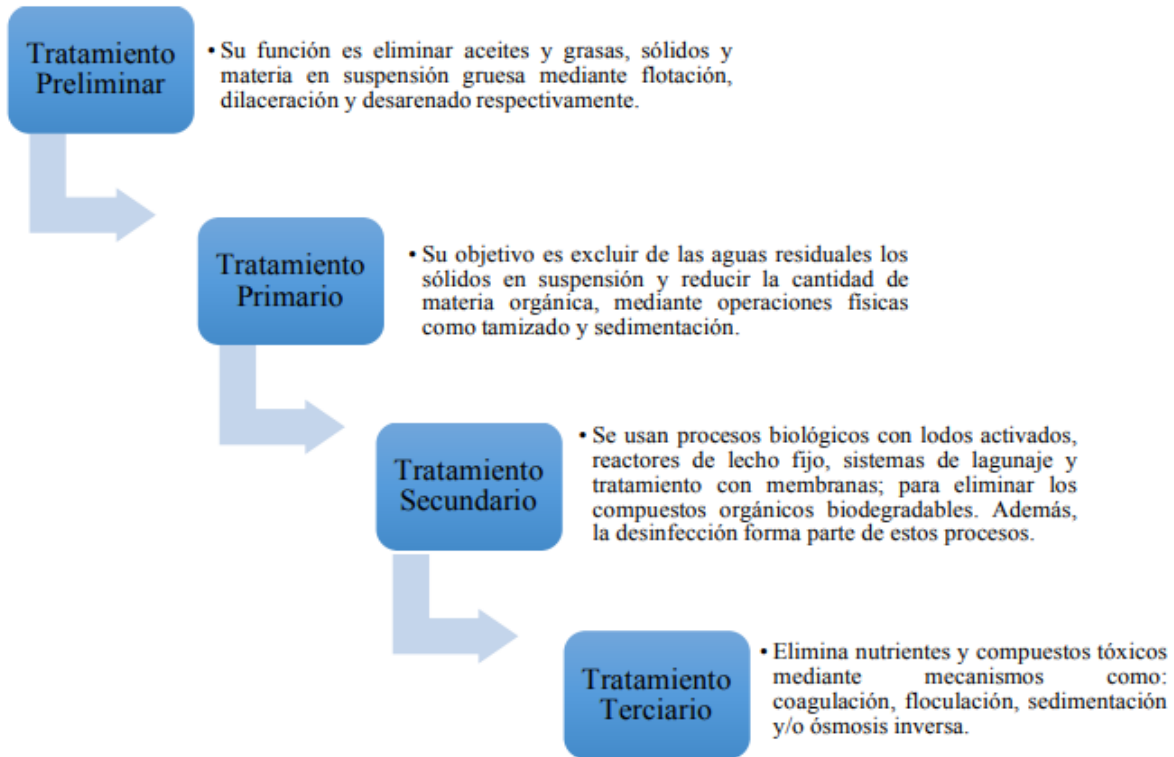
Nota. Breve contexto de la ruta que tiene el agua contaminada, junto a los impactos más relevantes que tienen estos contaminantes, Paulkumar, K., Jesi Reeta, T., Emmanuel Joshua Jebasingh, S., Mangalanagasundari, S., Muthu, K., & Murugan, K. (2021). Tomado de: Potential utilization of zinc nanoparticles for wastewater treatment. In *Aquananotechnology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821141-0.00026-4>.

Debido a estas malas prácticas presentadas en la actualidad la mayoría de los contaminantes es desechada a los ecosistemas, como se muestra en la Figura 1, presentando los distintos efectos adversos en plantas (al afectar su crecimiento y desarrollo), seres humanos (en forma de varias enfermedades) y vida marítima (destruyendo sus ecosistemas).

De una forma técnica el tratamiento de aguas residuales es la transformación física, química o biológica que sufren las aguas residuales al ser sujetadas a un conjunto de procesos, operaciones o técnicas, en busca de minimizar todos los problemas de salud pública, al igual que se producen efluentes que cumplen los estándares establecidos, de acuerdo con las reglamentaciones existentes y con el aprovechamiento potencial del fluente. El tratamiento de aguas residuales puede ser clasificado por mecanismos o niveles, entre los cuales tenemos: pretratamiento o tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado. Dependiendo del proceso para el cual vaya a ser usado, varios mecanismos pueden actuar separada o simultáneamente (Torres Jaya, 2017, p. 8). En la Figura 2 se muestran los tratamientos existentes para la reutilización o disposición de las aguas residuales.

Figura 2.

Tipos de tratamiento de aguas residuales.



Nota. Análisis del piroclasto volcánico como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora y lubricadora de autos “Ambato”, ubicada en la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua. Tomado de: Soni, R., Pal, A. K., Tripathi, P., Lal, J. A., Kesari, K., & Tripathi, V. (2020). An overview of nanoscale materials on the removal of wastewater contaminants. *Applied Water Science*, 10(8), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01275-3>

2.2 Contaminantes presentes en las aguas residuales

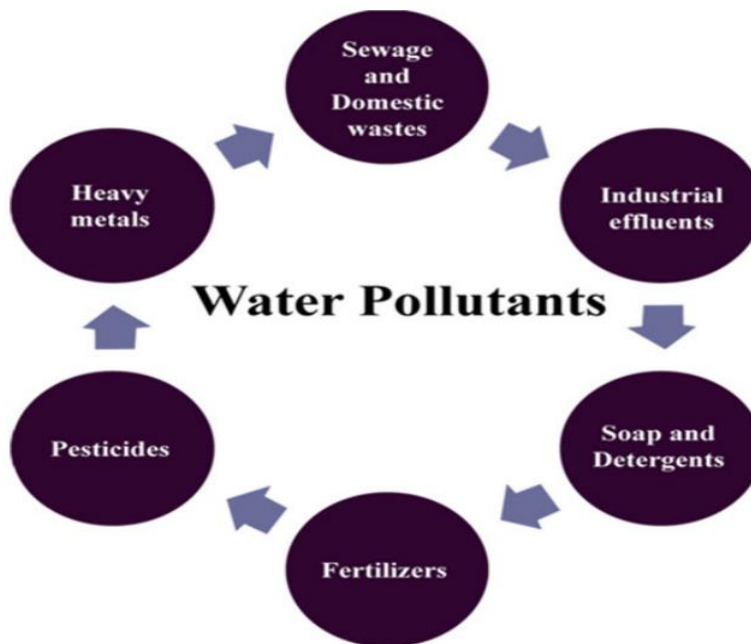
Las aguas residuales son los desechos líquidos provenientes del vertimiento de aguas negras, de origen urbano o industrial, en los que se tomen cualquier contaminante desde productos del petróleo, abono, pesticidas, minerales, detergentes, entre otros; conectados por un sistema de recolección que será finalmente vertido en fuentes de agua natural. Éstas pueden ser divididas en tres clases: negras, blancas o de lluvia y grises (Santiago Talenas, 2018, p. 51).

Las aguas residuales contienen distintos contaminantes que poseen efectos adversos a la salud, éstos contaminantes son residuos químicos y físicos, los cuales pueden ser orgánicos e inorgánicos, material biológico, radiológico o trazas de metales pesados; siendo su mayor contribuyente las industrias de tintas, las cuales son responsables de desechar aproximadamente el 20% del consumo

de tinte anual en cuerpos de agua (Tahir et al., 2020, p. 1). En este sentido, los contaminantes orgánicos más comúnmente encontrados incluyen hidrocarburos, normales y polinucleares, cetonas, grasas, proteínas y detergentes. Los contaminantes biológicos incluyen hongos, bacterias, algas, amebas y virus (Rafique et al., 2019, p. 99). Por su parte, los metales pesados representan una gran amenaza debido a que no pueden ser descompuestos por ningún microorganismo; otro punto para tener en cuenta, es el efecto que tienen organismos con los metales pesados, éstos pueden convertirlos en compuestos de metal orgánico que poseen una toxicidad mayor en comparación al metal natural (Qingping Wu, Xiaodong Xu, Haoyao Yang, 2017, p. 20). También se puede decir, entre los contaminantes mencionados, biológicos provenientes de microorganismos son una amenaza con mayor interés en la actualidad, debido a las enfermedades devastadoras que pueden ocasionar; en las cuales se pueden nombrar (según la organización mundial de la salud, siendo sus siglas en inglés “WHO”) campilobacteriiosis, hepatitis, dengue, cólera, malaria, entre otras (Anand et al., 2020, p. 70).

Figura 3.

Representación esquemática de contaminantes en el agua.



Nota. Representación gráfica de los contaminantes que pueden encontrarse en aguas residuales. Rafique, M., Tahir, M. B., & Sadaf, I. (2019). Nanotechnology: An Innovative Way for Wastewater Treatment and Purification. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02381-2_5.

Con el objetivo en mente de tener la mejor calidad posible para el agua tratada se debe conocer sus características en términos biológicos, químicos y físicos, los cuales están ligados al uso que tendrá el agua, ya sea para consumo humano, uso doméstico, riego de sembrados, etc. Factores como el oxígeno disuelto, la turbidez, la concentración de sal o pesticidas, la cantidad de agentes bacterianos, presencia de algas microscópicas, trazas de herbicidas, metales pesados, entre otros contaminantes, son los parámetros de referencia para evaluar la calidad del agua tratada (Mateus Malagón & Torres Castro, 2019, p. 22).

En el caso específico de Colombia la calidad del agua esta soportada por medio de las pruebas llevadas a cabo por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), además, en estudios especializados en indicadores de calidad del agua y amenazas potenciales por contaminación (Angulo García & Molina Suarez, 2020, p. 20).

2.3 Caracterización de las aguas residuales industriales

Se dice que el agua está contaminada cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en distintas actividades (Osorio et al., 2021, p. 230).

La caracterización de las aguas residuales, independiente de su origen, puede darse mediante el estudio de sus propiedades físicas y químicas. Algunas de las propiedades físicas prevalentes en el análisis son:

El olor, ya que este puede ser producto de la presencia de los gases liberados durante la descomposición de la materia orgánica, donde el agua residual posee un olor peculiar debido a la presencia de sulfuro de hidrogeno, resultado del proceso de la reducción de los sulfatos a sulfitos en la acción de los microorganismos. La caracterización y medida de olores se debe a cuatros factores importantes como el carácter, detectabilidad, sensación y la intensidad (Crombet-Grillet et al., 2013, p.2).

La densidad del agua residual, empleado como una alternativa el peso específico del agua residual obtenido del coeficiente ya establecido entre la densidad del agua y la densidad de agua residual, lo cual depende mucho de la temperatura y esta a su vez está en función de la concentración total de los sólidos presentes en el agua residual (Chacón et al., 2004, p. 96).

La temperatura, debido a que las aguas residuales presentan temperaturas mayores que las aguas no contaminadas, a causa de una mayor actividad bioquímica por parte de los microorganismos presentes en las aguas residuales, esta actividad bioquímica termina como un factor proporcional al aumento de la temperatura. A su vez se toma los puntos de descargas de aguas calientes procedentes de urbanizaciones junto a distintas aplicaciones industriales. La temperatura del agua es un parámetro importante ya que incide sobre el desarrollo de la vida acuática, debido a que el oxígeno es menos soluble en agua caliente (Osorio et al., 2021, p. 233).

La turbidez, es la relación del material coloidal y en suspensión presentes en el agua, la medición de la turbidez es realizada con métodos físicos como una comparación entre la intensidad de luz dispersada en la muestra y la intensidad de luz ya acotada en un registro de suspensión de referencia; esta característica es de suma importancia debido a que la materia coloidal suspendida en la superficie del agua absorbe la luz impidiendo su transmisión, dando pie a una variabilidad de proporción de los residuos sólidos suspendidos en el líquido de estudio (Llano et al., 2014, p. 74).

El color que presenta el líquido puede atribuirse a la presencia de sólidos suspendidos, al igual que una coloración verde en estas aguas se puede deducir al producto de las sustancias coloidales y sustancias disueltas presentes en el agua. El color es una característica importante porque permite, a simple vista, un diagnóstico básico del agua, atribuible las sustancias que se presentan comúnmente arrojadas en los desagües; ejemplos de estas sustancias pueden ser colorantes industriales, ácidos húmicos y fúlvicos, taninos entre muchos otros elementos más, cabe mencionar que se puede estimar con esta característica las condiciones que presenta el agua residual (Quintero & Cardona, 2011, p. 106).

El pH es el grado de alcalinidad o acidez que posee el agua, este es dependiente de la proporción de contracción de iones de hidrógenos, su valor oscila en una escala entre 0 y 14; siendo el pH =

7 el neutro, este valor es una característica importante porque nos permite saber el grado de acidificación que poseen las aguas residuales (Amaya, Wilson. Cañon Óscar. Avilés, 2004, p. 88).

A su vez se deben considerar como medio de caracterización física de las aguas residuales el contenido de sólidos disueltos en el agua, un análisis de sólidos totales y la distribución de estas partículas por su tamaño.

Las características químicas que permiten caracterizar el agua residual representadas por la sustancia que pueden estar disueltas en el agua, estos químicos son: Nitratos, puede ser procedente de la descomposición de materias vegetales y animales, o de los compuestos nitrogenados que en presencia de oxígeno algunos microorganismos presentes en el agua residual transforman la materia orgánica en el agua (D. L. L. Ortiz, 2009). Sulfatos, son solubles en agua, pueden proceder de la oxidación bacteriana de sulfuros, normalmente su concentración se presenta oscilando entre 20 y 50 mg/l (Osorio et al., 2021, p. 233). Hierro, están presentes en las aguas residuales por la producción de acero y otros materiales en la industria, este se encuentra prevalente en las aguas superficiales, estos compuestos químicos producen serios problemas en la salud como puede ser la dermatitis (Gilpavas et al., 2016, p. 24). Cromo, es presente en forma natural a pesar de esto en aguas residuales se trata de un metal contaminante el cual forma complejos aminados y cianurados, complejos de alta estabilidad con otros compuestos químicos como los cloruros, sulfatos, sales amónicas, cianuros y nitratos estos presentan un alto grado de toxicidad en los organismos (N. E. Ortiz & Carmona, 2015, p. 119). Cloruro, la presencia de los cloruros puede deberse a la disolución de depósitos de minerales naturales, estos pueden ser provenientes de diversos efluentes de la industria o del uso doméstico ya que también se puede tomar como indicador de la contaminación de carácter microbiológico de patógenos indeseables (Osorio et al., 2021, p. 233). Calcio, la presencia de este metal es en forma de sales solubles con aniones de bicarbonato, sulfato, fluoruro y cloruro, están asociadas con el nivel de mineralización (Ferreira-Rolón et al., 2014, p. 518). Zinc, su presencia en las aguas superficiales y subterráneas es rara, donde este elemento químico se encuentra de forma inorgánica, iónica y coloidal. Estos en grandes cantidades causan turbidez en las aguas residuales, este es un claro indicador de contaminación por baterías desechadas, aceites de motores erróneamente desechado o también como consecuencia de algún derrame de vertederos (Mancilla-Villa et al., 2011, p. 40).

Además de las propiedades físicas y químicas del agua residual esta puede ser caracterizada tanto por compuestos orgánicos presentes en el agua como por sus características biológicas. Los compuestos orgánicos más prevalentes presentes en las aguas residuales son: Carbohidratos, estas representan el 25% de los componentes orgánicos de las aguas residuales, suelen estar conformadas por azúcares en forma de almidones, los cuales son degradados por la actividad microbiana presente en las aguas residuales, también existen carbohidratos complejos de difícil degradabilidad dependiendo de la procedencia del agua residual (Salgado-Bernal et al., 2011, p. 18).

Proteínas, estas constituyen el 65% del material orgánico que se presenta en las aguas residuales, son los principales componentes químicos que se busca eliminar en los sistemas de tratamiento, también se puede producir el ácido sulfhídrico como producto de los aminoácidos azufrados presentes en las proteínas (Romero-Ortiz et al., 2011). Lípidos, están constituidos por aceites y grasas, conforman el 10% de los componentes orgánicos que se pueden presentar en las aguas residuales, se los considera componentes indeseables debido a que contribuyen a la obstrucción de tuberías, también ocasionan malos olores e inhiben la proliferación de microorganismos en el agua (Osorio et al., 2021, p. 233).

Las aguas residuales tratadas o crudas albergan un sin número de organismos vivos, entre los que se pueden encontrar patógenos para la salud humana como lo son: Bacterias, Virus y/o parásitos; a su vez se pueden presentar indicadores de contaminación fecal la cual puede contribuir a la presencia de *Escherichia Coli*, junto a bacterias nitrificantes como el Nitrobacter, Nitrosomas y las bacterias que tienen una acción oxidante con el azufre, junto a géneros importantes de bacterias como lo son las *Nocardia*, *Sphaerotillus* y los *Ciliados*, también los rotíferos y pedunculados (Osorio et al., 2021, p. 234).

En la Figura 4, se muestran distintas variables que pueden tomarse de cualquier vertiente de aguas, con el objetivo de categorizarla, además se observa las opciones de procedencia que puede tener esa característica en particular.

Figura 4.*Características y variables presentes en aguas residuales.*

CARACTERÍSTICAS	VARIABLES	PROCEDENCIA
Propiedades Físicas	Color	Aguas residuales (AR) domésticas e industriales, desintegración natural de materiales orgánicos.
	Olor	Aguas residuales en descomposición, vertimientos industriales.
	Sólidos	Aguas de suministros, AR domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexión incontrolados.
	Temperatura	AR domésticas e industriales.
Constituyentes Químicos		
Orgánicos	Carbohidratos	AR comerciales e industriales
	Grasa animal y aceite	AR domésticas, comerciales e industriales.
	Pesticidas	Residuos agrícolas.
	Fenoles	Vertidos industriales.
	Proteínas	AR domésticas y comerciales.
	Agentes termo activos	AR domésticas e industriales.
	Otros	Desintegración natural de los materiales orgánicos.
Inorgánicos	Alcalinidad	AR domésticas, agua de suministros, infiltración de aguas.
	Cloruros	Agua de suministro, AR doméstica, infiltración de aguas subterráneas.
	Metales pesados	Vertimientos industriales, AR domésticas y residuos agrícolas.
	Nitrógenos	AR domésticas y residuos agrícolas.
	pH	Vertimientos industriales.
	Fosforo	AR doméstica, industriales, escorrentía industrial.
	Azufre	Aguas de suministro, aguas residuales domésticas e industriales.
	Compuestos tóxicos	Vertidos industriales.

Figura 4. (Continuación)

CARACTERÍSTICAS	VARIABLES	PROCEDENCIA
Constituyentes Gaseosos	Sulfuro de hidrogeno	Descomposición de AR domésticos.
	Metano	Descomposición de AR domésticos.
	Oxigeno	Aguas de suministros, infiltración de agua superficial.

Nota. Cuadro descriptivo de propiedades fisicoquímicas de efluentes estudiados en el tratamiento de aguas residuales dependientes de su procedencia, basado en: Santiago Talenas, J. C. (2018). Estudio de la viabilidad del uso de nanopartículas de dióxido de titanio en el tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel laboratorio en la facultad de ingeniería química y textil de la universidad nacional de ingeniería. 1–135. http://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/931/SANTIAGO_TALENAS%2C_JAZMIN_CAROLINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

2.4 Métodos de tratamiento de aguas residuales en la actualidad

El tratamiento de aguas residuales involucra procesos primarios, secundarios y terciarios. Entre éstos se pueden contar procesos biológicos, químicos, físicos, fisicoquímicos, junto a técnicas comerciales y no comerciales; las cuales fueron desarrolladas con el propósito de tratar de diversas formas el agua contaminada. Las técnicas físicas son normalmente técnicas de separación de fase convencionales, como procesos de adsorción y filtración, además de procesos que buscan destruir los contaminantes, como oxidación/reducción química (Deshpande et al., 2020; I. Singh & Mishra, 2018). Los procesos industriales, al igual que la automatización, han aumentado exponencialmente el daño al ecosistema que se ha presentado como un rápido deterioro de la calidad de agua (Saravanan & Sasikumar, 2020, p. 10).

Los métodos de tratamiento de aguas convencionales más significativos son el cribado, filtración (incluyendo micro y ultrafiltración), cristalización, sedimentación, separación gravitatoria, floculación, precipitación, coagulación, extracción por solventes, oxidación, evaporación, osmosis inversa, destilación, intercambio de iones, electrólisis, electrodiálisis, la (previamente mencionada) adsorción, separación por membrana y centrifugación, fluidización, remineralización y neutralización, operaciones de oxidación-reducción, entre otros. A su vez, se usan muchos de estos métodos combinados entre sí dependiendo del tipo de contaminante que se busca eliminar (Devi

& Chaturvedi, 2021, p. 195). En la Figura 5 se presentan algunas limitaciones asociadas a la purificación de agua, llevada a cabo por medio de métodos convencionales.

Figura 5.

Limitaciones clave de algunos métodos de tratamiento de aguas por medios convencionales.

Métodos convencionales	Limitaciones
Destilación	La mayoría de los contaminantes permanecen en el agua.
	Alto requerimiento energético.
	Alto costos para bajos rendimientos.
	Remueve contaminantes con un punto de ebullición mayor a 100 °C.
Sedimentación	Método poco eficiente para la remoción de patógenos.
	Cerámica y microbios pequeños no se fijan, únicamente es posible la reducción a microbios bajos.
Microfiltración	Remueve solamente la materia suspendida y bacterias.
	Baja selectividad hacia microbios, en especial virus.
	Sensible a químicos oxidativos (por ejemplo: Ácido Nítrico, Ácido Sulfúrico, Peróxido y Persulfato en altas concentraciones).
	Se presentan incrustaciones en la membrana.
Métodos convencionales	Limitaciones
Ultrafiltración	No puede remover disolventes inorgánicos.
	Susceptibilidad a taponamiento de partículas y dificultad de limpieza.
	Alto requerimiento energético.
Transformación Química	Requiere exceso de reagentes.
	Calidad del producto baja y no puede desecharse directamente la mezcla al medio ambiente.
	Inactivo en condiciones extremas.
	Selectividad baja.
Coagulación y floculación	Método complejo con bajas eficiencias y requiere aditivos alcalinos para conseguir el pH óptimo.
Tratamiento biológico	Costoso y demorado.
	Microorganismos usados en el proceso son sensibles para algunos factores ambientales y difíciles de controlar.
Ósmosis inversa	Caudales son usualmente limitados a razones de gal/día.
Tratamiento Ultravioleta	No remueve partículas, coloides ni iones.
	Método costoso e inactivado por aguas turbias, ineficaz contra metales pesados.

Figura 5. (Continuación)

Métodos convencionales	Limitaciones
Nanofiltración	Alto requerimiento energético y pretratamiento.
	Costoso y pueden presentarse incrustaciones en la membrana, junto a una vida útil limitada.
	Retención limitada de sales (elementos solubles) e iones univalentes.
Filtros de Carbono	No remueve nitratos, flúor, metales, sodio, entre otros.
	Se presentan grumos con sólidos insolubles y requiere mantenimiento regular, en busca de prevenir el conglomerado de materia orgánica.

Nota. Cuadro que presenta algunas limitaciones que distintas técnicas que emplean nanotecnología poseen al ser empleadas como herramienta para el tratamiento de aguas residuales, basado en: Devi, K. P., & Chaturvedi, H. (2021). An overview of nanotechnology in water treatment applications and combating climate change. In *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*. INC. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820200-5.00004-X>.

3. NANOTECNOLOGÍA

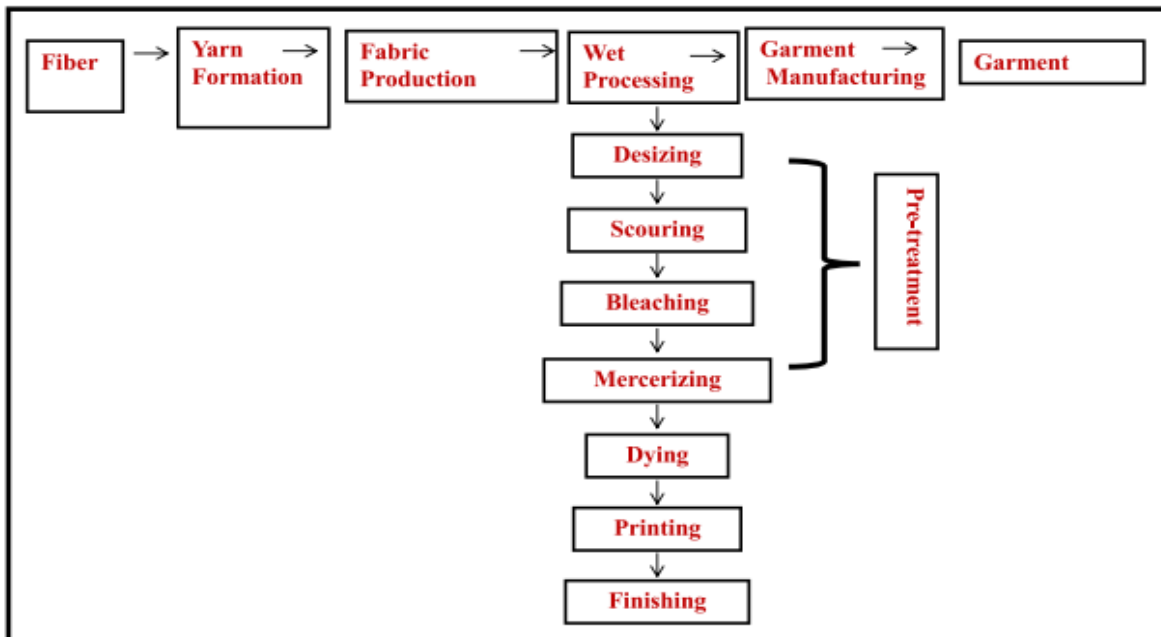
Los textiles poseen el segundo lugar, después de la comida, entre las necesidades sustanciales de la vida humana cotidiana. La industria textil transforma las fibras en hilo, convirtiendo el hilo en telas o productos similares, a su vez, tiñe y termina estos materiales a través de diversos procesos de producción. Distintos tintes, productos químicos, productos químicos auxiliares y agentes de encolado se utilizan durante el procesamiento húmedo en la industria textil. Por esta razón el proceso de producción en la industria textil lleva a la generación de aguas residuales que pueden resultar en problemas ambientales significativos. Por lo tanto, las aguas residuales producidas durante el procesamiento húmedo deben ser tratadas a profundidad antes de ser desechadas al medio ambiente (Madhav et al., 2018, p. 31).

3.1 Características de los efluentes provenientes de la industria textil

La composición de los efluentes textiles es que son extremadamente heterogéneos, contienen grandes cantidades de sustancias tóxicas que presentan un difícil tratamiento, derivadas de los procesos de tintura y acabado. El problema más pertinente de las aguas residuales provenientes de la industria textil es el uso de colorantes para impartir color, a su vez estos efluentes contienen una amplia gama de contaminantes, entre los cuales se pueden ver incluidos surfactantes, sales, metales pesados, enzimas, agentes oxidantes y reductores (Madhav et al., 2018, p. 32).

Figura 6.

Diagrama de flujo de las distintas etapas involucradas en la industria textil.



Nota. Diagrama de flujo básico del proceso de producción de la industria textil, desde el pretratamiento de materia prima hasta la producción de arreglos decorativos. Tomado de: Madhav, S., Ahamad, A., Singh, P., & Mishra, P. K. (2018). A review of textile industry: Wet processing, environmental impacts, and effluent treatment methods. *Environmental Quality Management*, 27(3), 31–41. <https://doi.org/10.1002/tqem.21538>.

La industria textil comprende un grupo variado de instalaciones que fabrican y/o procesan materias primas asociadas con textiles (por ejemplo, fibras, hilados y telas) para su procesamiento adicional hacia prendas de vestir, productos para el hogar y productos industriales. Las operaciones de la industria textil de diversas formas, recolectan y organizan fibras; transformando estas en hilo, hebra o cincha; luego convirtiendo el hilo en tela o productos afines; además de teñir y terminar estos productos durante los diversos pasos involucrados en la producción textil (Ghosh & Gangopadhyay, 2000, p. 627). En la figura 6 se muestra el proceso de producción de la industria textil de forma resumida, aun así, se puede destacar una división de las 4 etapas más generales:

- Formación de Hilo.
- Formación de Tejido.
- Procesamiento de Telas (procesamiento húmedo).
- Fabricación Textil.

3.1.1 Proceso Húmedo de textiles

El procesamiento en húmedo de textiles es una etapa clave en la fabricación de textiles, debido a que aporta el mayor valor a los textiles otorgándoles sus propiedades elegantes y prácticas. Esta etapa de producción de textiles requiere el uso de grandes cantidades de agua como intermediario en consecuencia esta agua está contaminada por colorantes no fijados, químicos y auxiliares, además, se libera como efluente en la etapa final, en la Figura 7 se presenta un resumen de los distintos contaminantes que se pueden presentar en estos efluentes, mientras que la Figura 8 presenta alternativas a químicos utilizados en algunos procesos de la industria textil. Los efluentes textiles en general son difíciles de tratar porque contienen un cóctel de productos químicos (Madhav et al., 2018, p. 32).

Figura 7.

Procesamiento en húmedo de textiles y generación de aguas residuales.

S. no.	Proceso	Contaminantes presentes en agua residual
1	Desencolado	DBO de tamaños solubles en agua; tamaño sintético; lubricantes
2	Fregado	NaOH, residuos de desinfectantes e insecticidas; detergentes; grasas; aceites; cera; lubricantes
3	Blanqueamiento	Peróxido de hidrógeno; silicato de sodio; estabilizador orgánico
4	Mercerizar	pH alto; NaOH
5	Tintura	Metales pesados; sales; tensioactivos; Demanda Biológica de Oxígeno (DBO); color
6	Estampado	Sólidos suspendidos; urea; solvente; color; metales; DBO
7	Refinamiento	DBO; DQO; Sólidos suspendidos; solventes usados

Nota. Listado de contaminantes que suelen presentarse en cada etapa de la producción de productos textiles. Tomado de: Madhav, S., Ahamad, A., Singh, P., & Mishra, P. K. (2018). A review of textile industry: Wet processing, environmental impacts, and effluent treatment methods. *Environmental Quality Management*, 27(3), 31–41. <https://doi.org/10.1002/tqem.21538>.

Figura 8

Productos químicos no convencionales ecológicos para el procesamiento húmedo de textiles.

S. no.	Proceso	Químico convencional	Químicos alternativos
1	Encolado	Almidón	Alcohol polivinílico soluble en agua
2	Desencolado	Ácido clorhídrico	Amilasa
3	Decapado de algodón	Hidróxido de sodio	Pectinasa
4	Blanqueamiento	Hipocloruro	Peróxido de hidrógeno
5	Oxidación de tinturas de tina y de azufre	Dicromato de potasio	Peróxido de hidrógeno
6	Espesante	Queroseno	Copolímero de poliacrilato base agua
7	Agente hidrotrópico	Urea	Dicianamida (parcialmente)
8	Hidrófugo	Fluorocarbonos C8	Fluorocarbonos C6
9	Agente humectante	Etoxilatos de alquilfenol	Etoxilatos de fenol de alcohol graso
10	Agente de neutralización	Ácido acético	Ácido fórmico
11	Mercerización	Hidróxido de sodio	Amoníaco líquido
12	Agente reductor	Sulfuro de sodio	Glucosa, acetilacetona
13	Tintura	La forma de polvo de colorantes de azufre	Tintes prerreducidos

Nota. Listado de químicos utilizados comúnmente en la producción de textiles y una sugerencia de una alternativa ecológica que podría ser utilizada en su lugar. Tomado de: Madhav, S., Ahamad, A., Singh, P., & Mishra, P. K. (2018). A review of textile industry: Wet processing, environmental impacts, and effluent treatment methods. *Environmental Quality Management*, 27(3), 31–41. <https://doi.org/10.1002/tqem.21538>.

3.1.2 Encolado y desencolado

En el proceso de encolado, el hilo se recubre para facilitar su uso en tejidos, tricotados y para hacer mechones. El encolado se realiza mediante la aplicación de productos químicos como alcohol polivinílico, carboximetilcelulosa y ácidos policíclicos. Se estima que alrededor de 750 kilogramos (kg) de material de encolado están presentes en el efluente descargado de una planta promedio que produce alrededor de 60,000 metros de tela (Central Pollution Control Board, 1999-2000). La presencia de elementos de apresto en el hilo dificulta procesos como el teñido, el estampado y el acabado. Por ejemplo, la existencia de almidón puede inhibir la dispersión del tinte en las fibras. Durante el proceso de desencolado, el almidón se separa o se altera en una condición soluble en agua, ya sea por hidrólisis o por oxidación (Madhu & Chakraborty, 2017, p. 117). Después de cada acción de desencolado, todos los restos de cola o cola desagregada se separan mediante un lavado seguido de una eliminación efectiva del agua de lavado. Después del lavado, el secado térmico se realiza en cilindros calentados por vapor o por aire caliente en una rama tensora (Horrocks, 2000). El proceso de desencolado aporta aproximadamente el 50% de la cantidad total de aguas residuales, que contienen altos niveles de demanda biológica de oxígeno (DBO). La aplicación de enzimas que pueden degradar el almidón en etanol simple en lugar de anhidroglucosa compleja puede resolver el problema. También se puede utilizar una disposición oxidativa como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para completar la disolución del almidón en dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) (Madhav et al., 2018, p. 32).

3.1.3 Descrude

En este proceso, la cera de algodón y otros componentes no celulósicos del algodón se separan con soluciones calientes de álcali, detergente o jabón, como glicerol, éteres y solventes para fregar (Madhu & Chakraborty, 2017, p. 120). El descrude se puede realizar en procesos discontinuos o continuos, lo que aporta importantes cargas orgánicas a los efluentes textiles que se acumulan por el uso de hidróxido de sodio (NaOH), desinfectantes, detergentes, residuos de insecticidas, pectina, grasas, aceites, cera, acabados de hilado, tejido lubricantes y solventes usados. El pH de estos efluentes es altamente alcalino, oscilando entre 10 y 11 (Madhav et al., 2018, p. 33).

3.1.4 Blanqueamiento

La sustancia de color natural del hilo imparte una apariencia cremosa a la tela. Es fundamental decolorar la lana mediante decoloración para adquirir una lana blanca que permita obtener tonalidades pálidas y brillantes (Madhu & Chakraborty, 2017, p. 120). El hipoclorito se ubica como uno de los agentes blanqueadores industriales más antiguos. Sin embargo, hoy en día, los organohalogenuros absorbibles también se utilizan como agentes blanqueadores. La producción de subproductos orgánicos clorados muy tóxicos en el proceso de blanqueo se puede disminuir mediante el uso de halógeno adsorbible orgánico (AOx), el ácido peracético ($\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$) también es una alternativa segura al hipoclorito, se pueden obtener valores de brillo más altos con menos daño a la fibra usando $\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$. En los últimos tiempos, los procesos preliminares de un solo paso para el desencolado, el descrudado y el blanqueo han ayudado a minimizar la cantidad y la toxicidad del efluente (Madhav et al., 2018, p. 33).

3.1.5 Mercerización

La tela y las fibras de algodón se mercerizan en forma gris después del blanqueo para proporcionar brillo, aumentar la resistencia y mejorar la absorción del tinte. El proceso de mercerización consiste en tratar los materiales de algodón con una solución fuerte de sosa cáustica (alrededor de 18 a 24 %) durante 1 a 3 minutos y luego lavar la solución cáustica. El encogimiento longitudinal del algodón puede ocurrir cuando se trata con esta solución. Por lo tanto, durante este proceso, las fibras/tejidos se mantienen bajo tensión para evitar que se encojan. La tela y las fibras obtienen las características requeridas de brillo, resistencia mejorada, potencial de absorción de tinte y absorbencia amplificada (Babu et al., 2007, p. 113). Pueden utilizarse técnicas de membrana para recuperar el NaOH presente en el agua de lavado. El uso de cloruro de zinc (ZnCl_2) es otra forma de aumentar el peso de la tela, acelerar la absorción del tinte y permitir la fácil recuperación de NaOH. Esta práctica no necesita neutralización, por lo que es respetuosa con el medio ambiente (Madhav et al., 2018, p. 33).

3.1.6 Tintura

Durante el teñido, se aplican pigmentos químicos (tintes) a las fibras o telas para proporcionar colores. En la industria textil, los tintes sintéticos, que normalmente se originan a partir del alquitrán de hulla y los productos intermedios de la industria del petróleo, son los más utilizados. En los tintes sintéticos, los átomos de cromóforos son responsables del color y los auxocromos, un sustituyente que retira o dona electrones, son responsables de la exageración del color. Se pueden agregar numerosos productos químicos, como asistentes de procesamiento orgánico, formaldehído, metales pesados, tensioactivos, sales y sulfuro a los tintes para mejorar la adsorción del tinte en las fibras, y estos productos químicos son contaminantes clave en las aguas residuales del proceso de teñido (Sarayu & Sandhya, 2012, p. 647). Los grupos de colorantes auxocromos y cromóforos también son responsables de la contaminación de los efluentes. En el proceso de tintura se aplica agua para llevar los colorantes en forma de vapor para calentar los baños de tratamiento. El teñido de la fibra de algodón requiere grandes cantidades de agua para operaciones húmedas. Por ejemplo, se requieren de 0,6 a 0,8 kg de cloruro de sodio (NaCl), de 30 a 60 gramos de colorante y de 70 a 150 litros (L) de agua para teñir 1 kg de algodón con tintes reactivos (Madhav et al., 2018, p. 33). Una vez que se completa el proceso de teñido, se liberan una variedad de baños de tinte coloreados que contienen cantidades elevadas de sales y sustancias orgánicas. En general, los baños de tinte están muy contaminados. Por ejemplo, las aguas residuales formadas por tintura reactiva comprenden tintes reactivos hidrolizados no fijados sobre los materiales textiles que representan del 20 al 30% de los tintes reactivos. Estos tintes no utilizados dan cuenta de los diferentes colores de los efluentes de las operaciones de teñido. Las sustancias orgánicas o los auxiliares de tintura no se pueden reciclar. Por lo tanto, su adición a los efluentes da como resultado una alta DBO y demanda química de oxígeno (DQO) de los efluentes (Babu et al., 2007, p. 114).

3.1.7 Estampado

El estampado suele interpretarse como "teñido localizado"; una división de teñido. En la impresión, los tintes se aplican a secciones seleccionadas de la tela que constituyen el diseño. Las reacciones necesarias involucradas en la impresión son similares al teñido. En el teñido, el color se usa en forma de solución, mientras que, en la estampación, el color se aplica como una pasta

espesa del tinte. La urea es el colorante reactivo químico más utilizado en la impresión y conduce a una alta carga de contaminación (Babu et al., 2007, p. 114). El PVC y los ftalatos en las pastas de impresión de plastisol agregan otro nivel de ansiedad, ya que su uso no es seguro para los trabajadores (Saxena et al., 2017, p. 47). Recientemente, las técnicas de impresión sin pantalla son más ecológicas que otras técnicas, como la impresión electrostática y la impresión por chorro de tinta, que con el paso del tiempo han ido evolucionando (Madhav et al., 2018, p. 34).

3.1.8 Refinamiento

Se requiere una variedad de operaciones de acabado en el procesamiento de textiles de fibras naturales y artificiales. El acabado se realiza para desarrollar características precisas en el tejido refinado e implica el uso de una gran cantidad de agentes de acabado diseñados para reticular, suavizar e impermeabilizar. Los agentes de acabado biocidas se utilizan para proporcionar ciertas características antimicrobianas al tejido textil acabado y también para proteger los productos finales de la degradación microbiana. Principalmente, los biocidas son productos químicos inorgánicos u organosintéticos que se utilizan para desinfectar, higienizar o esterilizar sustancias para conservar materiales o protegerlos de la degradación microbiana. Los biocidas textiles están relacionados principalmente con la toxicidad en los efluentes de las casas de tinte. De manera similar, los portadores de colorantes también contribuyen a la toxicidad de los efluentes textiles (Madhav et al., 2018, p. 34).

3.1.9 Impacto ambiental de los efluentes generados por la industria textil

El procesamiento de textiles es extremadamente intensivo en productos químicos e implica el uso de numerosos productos químicos no biodegradables y nocivos para el medio ambiente. Además, quedan grandes cantidades de productos químicos sin usar después de la etapa final de procesamiento junto con el agua de proceso. Los productos químicos tóxicos y no reciclables utilizados en los diversos procesos son difíciles de eliminar de las aguas de sentina, ya que requieren tratamientos terciarios y adicionales para abordar sus diversas propiedades; sin embargo, descuidar el tratamiento de estas aguas residuales conduce a la degradación ambiental cuando se liberan al medio ambiente. Como la mayoría de las unidades de procesamiento húmedo de textiles

están ubicadas en países en desarrollo o subdesarrollados en los que el procesamiento lo realizan pequeñas instalaciones que carecen de los recursos financieros para comprar y operar maquinaria costosa para el manejo adecuado de las aguas residuales, estos efluentes se liberan en los alrededores. medio ambiente sin un tratamiento adecuado para hacerlos seguros. Esto ha resultado en graves daños ecológicos en las inmediaciones de muchas de estas instalaciones (Saxena et al., 2017, p. 50).

Se requiere una gran cantidad de agua dulce, ya que se usa en múltiples procesos, incluida la utilización como medio, agente de lavado, solvente para la disolución de productos químicos y en la producción de vapor para calentar los baños del proceso. La cantidad precisa de agua utilizada se basa en la naturaleza de la sustancia que se procesa, los tipos de colorantes y agentes de acabado, así como el tipo de tecnología de manipulación empleada. Se estima que alrededor de 50 a 100 L de agua son necesarios para el procesamiento de 1 kg de materiales textiles (Mohammad Aslam Uqaili, 2011).

El agua se libera en el procesamiento húmedo junto con colorantes, productos químicos y auxiliares no fijados en forma de efluentes textiles. Los efluentes textiles son la combinación de productos químicos orgánicos e inorgánicos que difieren en concentración y características. Los efluentes textiles tienen valores altos de DBO, DQO, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales y valores bajos de oxígeno disuelto (DO) junto con un color fuerte (Madhav et al., 2018, p. 34).

Los contaminantes inorgánicos son principalmente compuestos básicos y ácidos junto con sales metálicas. Estas especies inorgánicas pasan por diversas interacciones bioquímicas en los cuerpos de agua receptores provocando una degradación en la calidad del agua. Las altas concentraciones de sales presentes en los efluentes textiles también degradan la calidad del suelo, lo que lo hace inadecuado para fines agrícolas. Los productos químicos orgánicos son reciclables y no reciclables por naturaleza. Los componentes orgánicos biodegradables degradan la calidad del agua, ya que se utiliza oxígeno para su descomposición, lo que da como resultado un OD bajo que, en última instancia, perturba la vida acuática (Saxena et al., 2017, p. 55). Los tintes de trifenilmetano (p. ej., violeta ácido 19, verde malaquita, violeta cristal) provocan fitotoxicidad en los cultivos agrícolas,

citotoxicidad en las células de mamíferos y estimulan el desarrollo de tumores en distintas especies de peces (Khataee et al., 2010, p. 100).

Los metales son necesarios para muchos tintes, ya que son los encargados de impartir el color. Los ejemplos incluyen cobre, zinc, cromo, plomo, cobalto, níquel y manganeso, que son metales pesados comunes asociados con diferentes tintes. La liberación de estos metales pesados en los cuerpos de agua y el suelo puede ser peligrosa tanto para la salud humana como para el medio ambiente. La degradación incompleta de los productos químicos puede conducir a la formación de aminas aromáticas debido a los grupos azo y nitros presentes en los colorantes orgánicos. Las aminas aromáticas son responsables de inducir cáncer y tumores en humanos (Pang & Abdullah, 2013, p. 756). Se ha informado que la exposición humana a los colorantes provoca irritación de la piel y los pulmones, dolores de cabeza, malformaciones congénitas y náuseas. Además, también se reporta la presencia de agentes mutagénicos en colorantes (Mathur et al., 2012, p. 2). Los compuestos orgánicos no biodegradables persisten en el ecosistema, infiltrando e interrumpiendo la cadena alimentaria. A medida que estos compuestos persistentes y se infiltran en la cadena alimentaria, se produce una bioacumulación que afecta negativamente a la vida animal y humana (Madhav et al., 2018, p. 34).

3.2 Comparación de los tratamientos de agua residual empleados por industrias textiles con otras industrias

3.2.1 Métodos de tratamientos de agua residuales empleados en la industria textil

Las técnicas de tratamiento de aguas residuales se han clasificado en los siguientes tres grupos: químicos, físicos y biológicos. En la actualidad, también se aplican algunas tecnologías de tratamiento avanzadas, como la degradación fotocatalítica, para la eliminación de colorantes de los efluentes textiles (Madhav et al., 2018, p. 35).

El tratamiento químico involucra varios procesos, incluyendo la coagulación/floculación, la oxidación química, reactivo de Fenton, ozonización, degradación fotoquímica, Hipoclorito de sodio (NaOCl), los cucurbiturilos y la destrucción electroquímica. Las operaciones de coagulación

y floculación se encuentran entre las técnicas más efectivas de tratamiento químico de aguas residuales, son empleadas con frecuencia en el tratamiento de efluentes textiles ya que requieren tiempos de internación cortos y son de fácil manejo. Los coagulantes más comúnmente empleados en los procesos de tratamiento de aguas residuales incluyen sulfato de aluminio o alumbre $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$, cal $[Ca(OH)_2]$ y sales férricas, como el sulfato férrico $[Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O]$ o cloruro $[FeCl_3 \cdot 7H_2O]$ (Madhav et al., 2018, p. 35). El proceso de coagulación es eficiente para la remoción de coloides y sólidos suspendidos; diferentes estudios reportan que este tipo de contaminantes representan alrededor de 50 % de la DQO total de un efluente textil. Por consiguiente, se emplea generalmente como etapa de pretratamiento, de ahí que sea necesario efectuar un tratamiento posterior con el objeto de eliminar los contaminantes remanentes y satisfacer la legislación ambiental. Después del proceso de coagulación, los compuestos orgánicos remanentes en este tipo de efluentes son compuestos con estructuras aromáticas complejas y detergentes con alta solubilidad en agua, resistentes a la degradación mediante procesos biológicos (Alonso et al., 2018, p. 159).

Los tratamientos alternativos que han sido objeto de estudio en las últimas décadas son los procesos avanzados de oxidación, como los procesos Fenton y foto-Fenton. Se ha encontrado que estos procesos son altamente eficientes para la degradación de colorantes presentes en aguas residuales de la industria textil (Alonso et al., 2018, p. 159). Los procesos oxidativos son las técnicas más aplicadas de tratamiento de efluentes textiles por método químico siendo el agente oxidante clave el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el H_2O_2 requiere activación por distintos métodos, como la radiación UV. Algunas técnicas de decoloración química pueden realizarse por medio de la activación con peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La oxidación química elimina el colorante del efluente al romper el anillo aromático de las moléculas del colorante (Madhav et al., 2018, p. 35). Los procesos Fenton se centran en la generación de especies químicas altamente oxidantes, principalmente el radical hidroxilo ($-OH$) producido mediante la descomposición de H_2O_2 en presencia de Fe^{2+} como catalizador (Alonso et al., 2018, p. 160).

El ozono es un agente oxidante muy valioso ya que es altamente inestable en comparación con el cloro y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La oxidación con ozono es capaz de degradar fenoles, pesticidas, hidrocarburos clorados y otros hidrocarburos aromáticos. Una vida media corta es el

principal inconveniente de la ozonización. El ritmo de descomposición del ozono aumenta en un entorno alcalino, por lo que es esencial observar atentamente el pH del efluente. La técnica de degradación fotoquímica descompone las moléculas de colorante en CO_2 y agua (H_2O) mediante la aplicación de radiación ultravioleta (UV) en presencia de H_2O_2 . El mayor beneficio que aporta el tratamiento fotoquímico es que no se producen lodos, lo que reduce los malos olores. El procedimiento que emplea hipoclorito de sodio (NaOCl) ataca el cloro en el grupo amino presente en las moléculas del tinte, ya que inicia y acelera la disolución del enlace azoico; sin embargo, esta técnica no es adecuada para tintes dispersos. La aplicación de cloro para eliminar el tinte se ha vuelto cada vez menos común en los últimos años debido a los efectos nocivos que tiene sobre los cuerpos de agua receptores, a la vez que puede liberar moléculas cancerígenas de aminas aromáticas. El cucurbituril es un polímero cíclico de glicolurilo y formaldehído, forma un compuesto huésped-huésped con compuestos aromáticos, y esto podría facilitar la adsorción de colorantes reactivos. Una hipótesis anticipada adicional se basa en interacciones hidrofóbicas o la formación de agregados de cucurbiturildyección insolubles, ya que la adsorción ocurre rápidamente. La destrucción electroquímica es un procedimiento comparativamente novedoso que evolucionó a mediados de la década de 1990. Requiere poca utilización de productos químicos, lo que da como resultado que no se generen lodos en el proceso. Los metabolitos degradados normalmente no son peligrosos, por lo que es seguro que los efluentes tratados se descarguen en los cuerpos de agua receptores. Es una técnica eficaz y económica para la eliminación de los colorantes degradados (Madhav et al., 2018, p. 35).

En los tratamientos de tratamiento físicos se pueden encontrar distintos procesos, de los cuales principalmente se pueden destacar dos grandes grupos que son empleados con frecuencia, los procesos de adsorción y filtros de membrana.

Aunque muchas tecnologías convencionales están disponibles para superar la escasez de recursos hídricos, el valor económico, el alto requerimiento de energía, la generación de lodos tóxicos y la eliminación limitada de contaminantes representan limitaciones significativas. La adsorción, una técnica económica y eficiente que utiliza una gran variedad de adsorbentes, se recomienda para la eliminación efectiva de diferentes tipos de contaminantes de las aguas residuales. Aunque el proceso es bien conocido con el propósito de recuperación de recursos hídricos industriales,

potables y otros; la falta de adsorbentes adecuados de alta capacidad y el uso limitado en columnas a escala comercial representan restricciones. Según el tipo de contaminante y sus propiedades, se pueden seleccionar los adsorbentes para el proceso de eliminación. Además del carbón activado, los desechos agrícolas y los subproductos industriales han surgido ampliamente como adsorbentes de bajo costo para los procesos de tratamiento (Sridevi et al., 2021, p. 2).

Estos adsorbentes pueden provenir tanto de productos naturales como subproductos industriales, entre los productos naturales se pueden resaltar los adsorbentes a base de arcilla, Desde los días más primitivos de la civilización, el uso de minerales arcillosos naturales ha sido ampliamente trabajado y conocido por la sociedad. Gracias a su bajo costo, abundante presencia en todo el mundo, alta calidad de sorción y eficiencia de intercambio iónico; razón por la cual los materiales arcillosos son empleados ampliamente como adsorbentes. La arcilla de montmorillonita es la arcilla más utilizada para la adsorción, ya que tiene la mayor superficie y capacidad de intercambio catiónico de todas las arcillas. Muchos investigadores han investigado las interacciones que se presentan entre los tintes y las partículas de arcilla. Adsorbentes a base de zeolitas, estas son aluminosilicatos extremadamente porosos con estructuras de cavidades tridimensionales diversas que tienen redes cargadas negativamente. A lo largo de los años, muchos investigadores han estado trabajando para comprender el comportamiento adsorbente de las zeolitas naturales. La alúmina, es encontrada más comúnmente en la forma de bauxita, la que a su vez es una alúmina cristalina porosa de origen natural que a menudo se tiñe con caolinita y óxidos de hierro. Las propiedades de eliminación de colorantes de la alúmina han sido estudiadas por muchas investigaciones en las últimas décadas. Un último material natural que puede componer los adsorbentes son los residuos sólidos provenientes de la industria agrícola, entre estos residuos resalta la utilización de carbón activado como adsorbente natural. Es el adsorbente más comúnmente empleado para la eliminación de colorantes, debido a su eficacia en la adsorción de colorantes catiónicos, ácidos, mordientes y, en menor medida; colorantes directos, dispersos, pigmentarios, de tina y reactivos. El carbón activado generalmente es producido mediante materiales de bajo costo disponibles localmente, como carbón, cáscaras de coco, lignito, madera y similares. Se han utilizado como adsorbentes diversos desechos sólidos de la industria ganadera en bruto y materiales de desecho del sector agrícola, ya que tienen un buen potencial adsorbente presentan un bajo costo. El aserrín, es un subproducto abundante de la industria maderera y es de fácil acceso en las zonas rurales a

bajo costo o, en ciertos casos, sin costo alguno. La corteza, una sustancia rica en polifenoles, es otro residuo de la industria maderera y se ha demostrado su efectividad para eliminar los tintes presentes en efluentes textiles. El residuo del cultivo de helechos arborescentes también ha sido estudiado por presentar la misma capacidad que posee la corteza en remover tintes presentes en efluentes textiles. Aparte de estas sustancia principales se han estudiado diversas alternativas como los huesos de dátiles, la paja de trigo, las virutas de madera y la piel de naranja; los cuales también se han utilizado como adsorbentes en el tratamiento de efluentes de la industria textil que contienen colorantes (Madhav et al., 2018, p. 35-36).

Las ventajas del método de filtración por membrana incluyen: buena selectividad de separación, ausencia de subproductos o productos químicos adicionales generados, capacidad de ser reciclado, además de su conveniencia frente a operaciones continuas a gran escala (Wang et al., 2021, p. 2). La selección de un proceso de filtración por membrana adecuado (como la ósmosis inversa, la nanofiltración, la ultrafiltración o la microfiltración) depende de las características del producto de desecho. Las membranas utilizadas para los procesos de ósmosis inversa poseen tasas de retención del 90 % o más para la mayoría de los compuestos iónicos, a su vez, generan un buen permeado. En estos procesos la remoción de color y la remoción de auxiliares químicos presentes en los efluentes textiles se pueden realizar en un solo paso. La nanofiltración es una técnica empleada para la remediación de aguas residuales textiles coloreadas. Comúnmente se presenta la posibilidad que se requiera una combinación de nanofiltración junto con adsorción para tratar algunos efluentes textiles. La ultrafiltración tiene la posibilidad de ser utilizada para eliminar parcialmente los colorantes de los efluentes textiles, a su vez, es comúnmente empleada como pretratamiento para ósmosis inversa o junto con un reactor biológico. La microfiltración es utilizada para el tratamiento de baños de tintura que contienen colorantes pigmentarios, al mismo tiempo puede ser empleada para el proceso de enjuague de estos baños. Una alternativa puede ser su uso en el pretratamiento para llevar a cabo una nanofiltración u ósmosis inversa (Madhav et al., 2018, p. 36).

La decoloración de los tintes por cepas bacterianas era inicialmente ejecutada mediante reducción anaeróbica catalizada por azoreductasa o por medio de la ruptura de los enlaces azo seguido de degradación aeróbica o anaeróbica de las aminas aromáticas resultantes por una comunidad

bacteriana mixta (P. Singh et al., 2017, p. 162). Esta es una pequeña introducción del papel que los métodos biológicos presentan en el tratamiento de aguas residuales; en el caso particular del tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil se pueden encontrar distintos métodos biológicos. Los informes acerca de la aplicación de la degradación bacteriana de los colorantes azo son escasos, a pesar de esto se ha encontrado que algunos organismos tienen la capacidad de reducir la presencia de colorantes presentes en efluentes provenientes de la industria textil. *Pseudomonas aeruginosa* posee la capacidad de decolorar tintes comerciales para la curtiduría y los efluentes textiles, principalmente el Navitan Fast Blue SSR, en presencia de glucosa en condiciones aeróbicas. A su vez, se reporta degradación aeróbica del colorante por medio de diferentes cepas biológicas. En condiciones anaeróbicas, la reducción azo se consigue rompiendo el enlace azo, sin embargo, este proceso produce aminas tóxicas. En estas mismas condiciones, los tintes se escinden fácilmente, produciendo aminas aromáticas, las cuales son productos de biotransformación estable del metabolismo. Varios investigadores han descrito la decoloración anóxica de diferentes tintes por microorganismos aerobios y anaerobios facilitadores mixtos. A pesar de que varios microorganismos son capaces de crecer aeróbicamente, la decoloración solo se logra en condiciones anóxicas. Cepas bacterianas puras, como *Pseudomonas luteola*, *Aeromonas hydrophila*, *Bacillus subtilis* y *Proteus mirabilis* degradaron colorantes azoicos en condiciones anóxicas. Ha sido sugerido repetidamente que las aminas aromáticas formadas durante la degradación anaeróbica de los colorantes azo pueden ser degradadas de forma más eficiente por medio de la acción aeróbica. La viabilidad de este enfoque fue probada por primera vez para los colorantes azoicos sulfonados "Amarillo mordiente". Después de la aireación, las aminas formadas en el estudio fueron completamente mineralizadas por los microorganismos (Madhav et al., 2018, p. 37).

Los métodos de tratamiento tradicionales como la ozonización, la cloración y la filtración tienen sus propias limitaciones de fuentes de energía correspondientes al igual que la producción de desechos destructivos. Las técnicas de degradación fotocatalítica de tintes orgánicos tienen el potencial de ser efectivas en el tratamiento de efluentes textiles gracias a sus fuertes capacidades de oxidación, bajo costo, alta efectividad, amplia aplicabilidad y características amigables con el medio ambiente (Madhav et al., 2018, p. 37).

3.2.2 Comparación de los tratamientos de aguas residuales entre la industria textil y otras industrias

Las características de las aguas residuales producidas en una industria textil serán dictadas por las transformaciones que se efectúen, principalmente enfocadas en la clase de fibra procesada y del procedimiento empleado. A su vez estas pueden verse afectadas por la diversidad de procedimientos y de reactivos químicos usados, por ejemplo, las aguas residuales generadas en la industria de fibras naturales muestran unas particularidades características, con excepción de las características que pueden ser producidas en el lavado de la lana. La composición de los efluentes producidos en la industria textil suele ser bastante diversa, siendo alta su concentración de alcalinos, temperaturas altas y coloreados. Los contaminantes que comúnmente se presentan son compuestos orgánicos, colorantes sólidos suspendidos y aceites minerales, los cuales suelen ser compuestos xenobióticos recalcitrantes a los procesos biológicos. Además, existe la posibilidad de que se encuentren presentes metales pesados como cobre, zinc, cromo, níquel o plomo, en concentraciones representativas. También, en el proceso de manufactura de la fibra natural, el agua residual puede tener en su contenido algunas concentraciones de pesticidas y contaminantes microbiológicos, como hongos, bacterias y otros patógenos (Gilpavas, 2020, p. 2).

Figura 9.

Cuadro comparativo entre industria textil y distintas industrias.

INDUSTRIA TEXTIL	OTRAS INDUSTRIAS
<ul style="list-style-type: none"> • En los tratamientos de tratamiento físicos se pueden encontrar distintos procesos, de los cuales principalmente se pueden destacar dos grandes grupos que son empleados con frecuencia, los procesos de adsorción y filtros de membrana. Las ventajas del método de filtración por membrana incluyen: buena selectividad de separación, ausencia de subproductos o productos químicos adicionales generados, capacidad de ser reciclado, además de su conveniencia frente a operaciones continuas a gran escala. • 	<ul style="list-style-type: none"> • En la actualidad existen distintas tecnologías convencionales altamente mecanizadas para tratar aguas residuales industriales como lo es el pretratamiento industrial ya sea rejillas, tamices, microfiltros y desarenador. • Tratamientos secundarios como lecho bacteriano, lodos activados, filtros verdes, entre otros. • Tratamientos avanzados o terciarios tales como ósmosis inversa, destilación, coagulación, adsorción, etc. •

Figura 9.(Continuación)

<ul style="list-style-type: none"> • El tratamiento químico involucra distintos procesos, en los cuales se cuenta la coagulación/floculación, la oxidación química, reactivo de Fenton, ozonización, degradación fotoquímica, Hipoclorito de sodio (NaOCl), los cucurbiturilos y la destrucción electroquímica. Se ha encontrado que estos procesos son altamente eficientes para la degradación de colorantes presentes en aguas residuales de la industria textil. • Los informes acerca de la aplicación de la degradación bacteriana de los colorantes azo son escasos, a pesar de esto se ha encontrado que algunos organismos tienen la capacidad de reducir la presencia de colorantes presentes en efluentes provenientes de la industria textil. • Los métodos de tratamiento tradicionales como la ozonización, la cloración y la filtración tienen sus propias limitaciones de fuentes de energía correspondientes al igual que la producción de desechos destructivos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los distintos tipos de tratamientos tienen costos elevados debido a que los procesos demandan un alto consumo energético. • Otro tipo de sistemas de tratamiento son los ecológicos, como las lagunas de oxidación y humedales construidos, estos requieren grandes terrenos para su implementación, pero presentan grandes ventajas como lo pueden ser el casi nulo consumo eléctrico, bajos costos de operación, junto a altas eficiencias de remoción de contaminantes y patógenos. • Los sistemas convencionales para el tratamiento de aguas residuales presentan tres impactos importantes en el medio ambiente: el agotamiento de recursos no renovables debido a altos consumos requeridos, la degradación ambiental ocasionada por el uso desmesurado de petróleo y sus derivados y el procesamiento de grandes cantidades de productos resultantes de diferentes procesos no ambientales. Por otra parte, los sistemas convencionales no reducen el contenido de microorganismos patógenos de forma sustancial.
---	---

Nota. Comparación de las características esenciales del tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil a diferencia de los estándares y técnicas encontradas comúnmente en otras industrias. Basado en: Madhav, S., Ahamad, A., Singh, P., & Mishra, P. K. (2018). A review of textile industry: Wet processing, environmental impacts, and effluent treatment methods. *Environmental Quality Management*, 27(3), 31–41. <https://doi.org/10.1002/tqem.21538>.

La Figura 9 permite observar el avance tecnológico que se encuentra en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil teniendo como referente las técnicas e investigaciones propuestas por todo el sector industrial en la actualidad.

Podemos deducir por medio de la tabla 5 que la industria textil, en búsqueda de garantizar buenas prácticas ambientales y de desarrollo sostenible, ha sido participe en la investigación y ejecución de las distintas técnicas empleadas para el tratamiento de aguas residuales que conciernen al sector industrial.

4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE NANOTECNOLOGÍA

Buscando dar soluciones a la demanda mundial de control de la contaminación global se estudia el desarrollo de procesos químicos amigables con el medio ambiente, simples y de bajo costo (Albukhari et al., 2019, p. 549). Por eso la mayoría de los países en desarrollo empiezan a hacer uso de fuentes hídricas poco convencionales, entre las cuales se pueden mencionar el agua lluvia, agua potable contaminada, agua salobre, entre otras. Los sistemas de tratamiento de agua, distribución de sistemas y los hábitos de desecho, junto a los esquemas centralizados que existen el día de hoy no son sostenibles (Trivedi & Bergi, 2021, p. 177).

Desarrollos en investigaciones a nanoescala han abierto posibilidades de invertir en tratamientos de aguas residuales con tecnologías innovadoras sostenibles, gracias a todas estas posibilidades se puede sugerir que la nanotecnología puede solucionar muchos de los problemas que presentan las aguas residuales, mediante el uso de distintos tipos de nanofiltros o nanopartículas (Trivedi & Bergi, 2021, p. 178).

La nanotecnología, en especial la nanotecnología ambiental, juega un rol importante en diseñar métodos innovadores, simples y bajos en costo; en búsqueda de ser usados en reconocimiento, degradación, reducción y la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Albukhari et al., 2019, p. 549). En la actualidad se prefiere, como una técnica alternativa, la síntesis de nanopartículas mediante el uso de algas marinas, partes de plantas, frutas y microorganismos; en búsqueda de reemplazar químicos peligrosos para el medio ambiente (Magdalane et al., 2019, p. 2).

4.1 Estado de la nanotecnología en la actualidad

La nanotecnología comprende materiales y herramientas en un rango de tamaño desde 1 nm hasta 100 nm, con enlaces químicos que tienen tamaños en rangos de decenas de un nanómetro (1×10^{-9} m) (Chávez-Lizárraga, 2018, p. 53), enfocándose en el desarrollo de éstos, con el objetivo de cumplir el ámbito de que se encuentren en el rango de tamaño previamente establecido (Saravanan & Sasikumar, 2020, p. 10). A esta escala los materiales poseen distintas propiedades físicas,

químicas y biológicas, las cuales son atribuibles a su estructura junto a su razón alta de área-volumen; además, permiten ofrecer la prevención, detección, sensores, tratamiento y remediación de contaminantes en el agua (Trivedi & Bergi, 2021, p. 178).

El uso de la nanotecnología abre la puerta hacia una ruta extremadamente eficiente, flexible y multifuncional para distintos procesos, que puedan ser adaptadas para reemplazar infraestructuras antiguas empleadas en la actualidad. Avances en la nanotecnología resaltan las grandes oportunidades de sintetizar la nueva generación de sistemas de abastecimiento de agua (Ibrahim et al., 2016, p. 13762). A su vez, esta ha explorado la oportunidad de crear materiales novedosos que posean propiedades electrónicas y ópticas distintas a aquellas presentes en sus materiales naturales (Albukhari et al., 2019, p. 550).

La implementación responsable de la nanotecnología genera una nueva perspectiva multifacética en la seguridad, la cual engloba lineamientos más estrictos de aquellos que se presentan en prácticas de laboratorio o en procesos de manufactura a nivel de plantas piloto. La integridad de los nanomateriales debe ser mantenida a lo largo de su vida de utilidad y, si es posible, un periodo más largo; para conseguir este propósito es necesario un entendimiento de las interacciones moleculares entre nanopartículas (Holland & Zhong, 2018, p. 6037).

Para la síntesis de nanomateriales existen dos enfoques, el primero involucra la construcción, también denominada “cuesta arriba” o “Bottom-Up”, mediante la cual los materiales y estructuras se construyen desde los componentes moleculares siendo ensamblados químicamente por los principios de reconocimiento molecular (micela reversa, germinación, interacción enzima-sustrato y principios biomimétricos). El segundo se trata de la destrucción, conocida como “cuesta abajo” o “Top-Down”, en este enfoque las nanoestructuras son construidas a partir de estructuras de mayor tamaño sin ningún control a escala atómica (por ejemplo métodos como: nanolitografía, grabado químico, entre otros), al sobresaturar las fases solubles, ocasionando un cambio de solubilidad, se generan las nanopartículas (Chávez-Lizárraga, 2018, p. 54).

La metodología Top-Down consiste en una secuencia de operaciones físicas que buscan alcanzar una división de la materia sólida en fracciones de menor tamaño, en ellas suelen aparecer procesos

como el desgaste, implantación de iones, evaporación térmica y la activación mecano química que involucra la molienda (Calcina Mamani & Moreno Cusi, 2020, p. 10). En la Figura 10 se presentan, de manera resumida, los distintos procesos que involucran la metodología Top-Down.

Figura 10.

Resumen métodos Top-Down fase sólida.

Sistema de molienda	En seco
	En húmedo
Método mecánico-químico	Molienda + Ultrasonidos
Método químico	Deposición química de vapor (CVC: llama, plasma, láser, horno eléctrico) Descomposición térmica

Nota. Procesos de síntesis de nanotecnología que emplean la metodología Top-Down divididos en métodos mecánicos y químicos, los cuales pueden ser llevados a cabo tanto en seco como húmedo. Tomado de: Calcina Mamani, R., & Moreno Cusi, Y. (2020). Una mirada a la nanotecnología y su aplicación ambiental en el tratamiento de aguas para consumo humano. Ingeniería, Facultad D E Electronica, Electrica Y Ciclo, V I, 1-94. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/3452>.

En comparación la metodología Bottom-Up dice que la síntesis de nanopartículas hace uso de procesos químicos, como el uso de la condensación de átomos o entidades moleculares, o por medio de diferentes métodos como el coloidal, la reducción fotoquímica y radiolítica, la utilización de dendrímeros, la síntesis solvotermal, la irradiación con microondas y el método sol-gel, en una fase gaseosa o en solución (Calcina Mamani & Moreno Cusi, 2020, p. 11). Al igual que la Figura 10 muestra un resumen de los procesos que pueden conformar la metodología Top-Down la Figura 11 resume los diferentes procesos que se pueden observar en la metodología Bottom-Up.

Figura 11.

Resumen métodos Bottom-Up.

En Fase Sólida	Método Físico	Deposición Física de Vapor (PVD) Plasma, Calentamiento por inducción, Hidrólisis con llama, Haz de electrones, Láser, Epitaxia de haz molecular
En fase líquida	Método Líquido/Líquido	Reducción química Poliál-Ácido orgánico-Borohidrato de Sodio Azúcar

Figura 9. (Continuación)

	Reducción indirecta: Fotorreacción Rayos gamma
	Ultrasonidos
	Plasma líquido
	Secado por pulverización
	Pirólisis-Pulverización
	Síntesis solvotermal
	Síntesis supercrítica
	Sol-gel/Gel-sol
	Coprecipitación
	Precipitación alcalina
Método de sedimentación	Hidrólisis
	Química coloidal

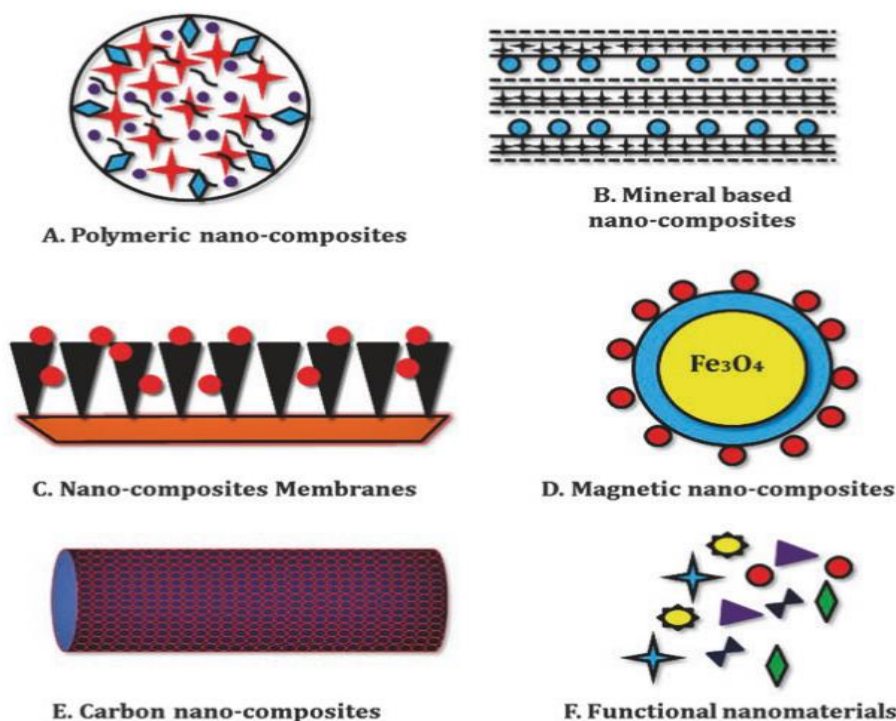
Nota. Procesos de síntesis de nanotecnología que emplean la metodología Bottom-Up divididos en métodos que son tanto en fase líquida como fase sólida, a su vez, pueden ser clasificado por el método que se emplea. Tomado de: Calcina Mamani, R., & Moreno Cusi, Y. (2020). Una mirada a la nanotecnología y su aplicación ambiental en el tratamiento de aguas para consumo humano. Ingeniería, Facultad D E Electronica, Electrica Y Ciclo, V I, 1–94. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/3452>.

4.2 Rol de la nanotecnología en el tratamiento de aguas residuales

Las nanopartículas utilizadas con mayor frecuencia, con un mayor enfoque en actividades para eliminar microorganismos contaminantes, son las nanopartículas de plata (Ag), óxido de titanio (TiO_2), los nanotubos de carbono (CNTs, por sus siglas en inglés “carbon nanotubes”), fulleroles, nanopartículas bimetálicas, nanopartículas de oro, alúmina (Al_2O_3) y nanopartículas de fullerenos sintetizados en medios acuosos (Anand et al., 2020, p. 73). Para dar un mejor entendimiento de estos materiales se presenta en la Figura 12 una representación gráfica de algunos de los nanomateriales previamente mencionados.

Figura 12.

Ilustraciones de los nanomateriales que pueden ser usados en el tratamiento de aguas residuales.



Nota. Representación gráfica de los nanomateriales que pueden ser empleados en el tratamiento de aguas residuales. Tomado de: Chaturvedi, V. K., Kushwaha, A., Maurya, S., Tabassum, N., Chaurasia, H., & Singh, M. P. (2020). Wastewater Treatment Through Nanotechnology: Role and Prospects. *Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards a Sustainable Environment*, 227–247. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7665-8_14.

Los tipos de nanomateriales más comunes son aquellos formados a base de carbono, gracias a sus diversos usos en el tratamiento de aguas residuales, ya sea como nanofiltros, membranas, nanoabsorbentes, etc. Éstos son clasificados en base a sus estructuras geométricas, pueden ser de forma tubular, como parábola, esférica o elipsoidal. De acuerdo a su forma las nanopartículas que poseen una estructura tubular son los previamente mencionados nanotubos de carbono; los elipsoides o esferas corresponden al grupo de los fullerenos (son modificaciones alotrópicas de carbono); mientras que las de forma parabólica son los nanocuernos (Chaturvedi et al., 2020, p. 231).

Por otro lado, los metales (junto a sus óxidos) han recibido una atención renovada para la remoción de microbios provenientes del agua, gracias a sus bajos costos y capacidad de eliminar éstos microorganismos (Anand et al., 2020, p. 74). En la Figura 13 se presentan aplicaciones en las que pueden participar diversos nanomateriales, que pueden ser involucrados en el tratamiento de aguas residuales.

Figura 13.

Aplicaciones de distintos nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales.

Nanomateriales	Aplicaciones
Nanotubos de carbón	Remoción de contaminantes orgánicos
Óxidos metales a nanoescala	Adsorción de radionúclidos de metales pesados
Nanocatalizador	Pesticidas, colorantes azoicos
Nanopartículas bioactivas	Remoción de bacterias y hongos
Membranas Biomimético	Remoción de sales
Peróxido de calcio a nanoescala	Destrucción de orgánicos (Ej: Gasolina)
Nano magnetita	Ósmosis inversa
Zeolita	Remoción de iones en metales pesados
Nanopartículas magnéticas	Remoción de contaminantes orgánicos e iones de metales pesados
Nanohojas de sulfuro de aluminio	Remoción de tinte

Nota. Cuadro de ejemplos de nanomateriales que tienen el potencial de ser utilizados en el tratamiento de aguas residuales, junto a una descripción breve de dichas aplicaciones. Tomado de: Mateus Malagón, A. L., & Torres Castro, J. A. (2019). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de bocadillos para la reutilización en riego agrícola implementando nanoarcillas modificadas magnéticamente como tratamiento terciario. [UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA]. In ACA. Pregrado Civil (Issue 1). <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24881>.

El uso de nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales es favorecido gracias a sus propiedades, de las cuales se pueden destacar su tamaño en nanoescala, su superficie de área modificable, al igual que, su razón alta entre superficie de área en comparación a volumen (Anand et al., 2020, p. 74).

Figura 14.

Papel de los nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales.

Nanomaterial	Propiedades/Aplicaciones	Limitaciones
Nanoadsorbentes	Tiene una alta superficie específica y buena capacidad de adsorción. Es utilizado con el objetivo de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, junto a bacterias.	Altos costos de producción
Nanometales	Contienen una gran superficie específica, al igual que corta distancia de difusión entre partículas. Es resistente a la abrasión y tiene un alto magnetismo.	Menor oportunidad de reúso
Nanomembranas	Proceso altamente confiable en todos los campos que engloban el tratamiento aguas y residuos.	Requiere un alto gasto energético
Fotocatálisis	Actividad fotocatalítica, baja toxicidad y costo, alta estabilidad.	Selectividad en la reacción
Desinfección y control microbiano	Fuerte actividad microbiana y de amplio espectro y facilidad de uso, baja toxicidad.	Pocos residuos de desinfección

Nota. Cuadro descriptivo de las propiedades y aplicaciones que distintos nanomateriales poseen, las cuales pueden ser de utilidad en el tratamiento de aguas residuales, a su vez se menciona las limitaciones que presentan estos nanomateriales. Tomado de: Mateus Malagón, A. L., & Torres Castro, J. A. (2019). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de bocardillos para la reutilización en riego agrícola implementando nanoarcillas modificadas magnéticamente como tratamiento terciario. [Universidad Católica de Colombia]. In ACA. Pregrado Civil (Issue 1). <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24881>.

La Figura 14 presenta un resumen del papel que pueden tener distintos nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales, resaltando las ventajas que poseen al igual que sus limitaciones. Diversos nanomateriales pueden ser modificados para mejorar varios procesos de tratamiento de aguas residuales, de estos procesos se pueden mencionar el diseño de nanoestructuras fotocatalítica con superficies químicas, energía en bordes de conducción las cuales permiten que la unión sea selectiva y la degradación de ciertos contaminantes por medio de luz solar, uso de nanoestructuras de carbono con una alta conductividad eléctrica, junto a una estructura porosa jerárquica que mejoran la capacidad de deionización para mejorar el rendimiento. Modificar la morfología y

superficie de área de electrodos por medio de nanotubos o estructuras tridimensionales macroporosas, en busca de mejorar la energía cinética y la transferencia de masa en la oxidación electroquímica, también se puede controlar el tamaño nanopartículas magnéticas para mejorar el supermagnetismo para la separación y recuperación de imanes (Alvarez et al., 2018, p. 635).

4.3 Ventajas que aporta la nanotecnología en el tratamiento de aguas

En la última década, los nanomateriales sintetizados a partir de materiales orgánicos o inorgánicos han ganado atención como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas residuales. Particularmente por el hecho de tener una alta afinidad y una considerable capacidad de unión para adsorber contaminantes en función de la hidrofobicidad, además del comportamiento de especiación de las aguas residuales. Óxido de níquel, carbono, zinc, hierro, titanio, nano arcilla, etc., son algunos de los materiales que son empleados para sintetizar los nanomateriales que funcionan como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales. Su pequeño tamaño, gran área de superficie, buena relación de "área de superficie a volumen" a nivel nanométrico que mejora su capacidad de adsorción, los catalogan como mejores materiales de adsorción en comparación a los materiales convencionales. Enfoques como la oxidación, la reducción, el proceso Fenton, la ozonización y la sonólisis suelen estar involucrados en la síntesis de estos nanocatalizadores que tienen el propósito de degradar los distintos contaminantes que se pueden presentar en las aguas residuales. Además de esto su superficie activa de pequeño tamaño y alta porosidad les permite adsorber, separar y eliminar los materiales contaminantes del agua, seguido de esto, los contaminantes pueden ser posteriormente degradados por medio de diversos métodos químicos y biológicos. Posterior a la saturación, los nanomateriales pueden ser regenerados químicamente. Las nanopartículas actúan como catalizadores en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales, la acción catalítica que puede presentarse puede ser una reacción homogénea o heterogénea. En la reacción homogénea, el catalizador se introduce directamente junto al agua residual, oxidando el efluente. En cambio, en la reacción heterogénea el catalizador es adherido a una superficie estable, en la cual se lleva a cabo la oxidación catalítica. En las últimas dos décadas, los nanomateriales híbridos como catalizadores heterogéneos combinados con procesos de oxidación avanzados (AOP) y procesos de oxidación híbridos avanzados se han utilizado con un enfoque en la investigación y el desarrollo del tratamiento de aguas residuales, la alta eficiencia

catalítica es ideal para posibles catalizadores heterogéneos. Un sistema de tratamiento de aguas residuales electroquímico heterogéneo basado en la química de Fenton es una de las tecnologías emergentes más emocionantes y eficientes para el tratamiento de aguas residuales, además en tiempos recientes se ha dirigido una amplia investigación hacia el desarrollo de diferentes nanocatalizadores metálicos heterogéneos sintéticos (Davarazar et al., 2021; Sridevi et al., 2021). A su vez cabe destacar que la calidad de los efluentes puede ser drásticamente mejorada mediante el uso de sistemas que empleen sistemas con nanotecnología, en éstos se pueden observar procesos como lo son a la microfiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa. A pesar de que el tratamiento de aguas residuales aún está en desarrollo, varios avances se han conseguido a lo largo de los años, plantas piloto de tratamiento y reúso de agua tratada, al igual que, nanopartículas de plata como nanofiltros para tratamientos de agua doméstica, han sido conseguidos. El enfoque actual de las investigaciones en este campo de investigación se puede dividir en cuatro áreas: la primera es la filtración de contaminantes por medio de membranas, la segunda es la eliminación de microcontaminantes mediante la adsorción de estos mismos en la superficie de nanomateriales, la tercera es la descontaminación microbiana y por último la degradación catalítica (Madhura et al., 2018, p. 13-16).

Para un mejor entendimiento de las necesidades y posibilidades que necesita y posee la nanotecnología como medio para tratar las aguas residuales se presenta la Figura 15, en ésta se pueden observar las propiedades requeridas por cualquier nanomaterial para llevar a cabo un proceso de tratamiento de aguas adecuado, a su vez, se puede observar las tecnologías necesarias que pueden ayudar a llevar a cabo estos procesos.

Figura 15.

Potencial de nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales y su reutilización.

Propiedades requeridas de los nanomateriales manufacturados	Tecnologías ayudadas por nanomateriales	Citaciones
Área de superficie específica y de gran valor	Altos absorbentes con una habilidad de adsorción irreversible alta (útil en la remoción de arsenico y otros metales pesados tóxicos usando nanopartículas magnetizadas) y reactantes	Mayo et al. (2007)
Propiedades catalíticas mejoradas	Fotocatalizadores en base de TiO ₂ y Fullerenos fueron usados como hipercatalizadores, además, híbridos de paladio/oro fueron utilizados en procesos de reducción para el tratamiento de aguas residuales para residuos de pesticidas	Hoffmann et al. (1995) and Nutt et al. (2005)
Propiedades antimicrobianas	Derivados de TiO ₂ y fullerenos fueron usados como desinfectantes sin coproductos tóxicos	Lee et al. (2009) and Yang et al. (2009)
Propiedades características (antibióticas, catalíticas, etc.)	Habilidad de autolimpieza, membranas de nanofiltración que tienen aspectos únicos para desactivar virus y eliminar contaminantes orgánicos	Zodrow et al. (2009)
Autoensamble en superficies	Este ensamble reducirá el contacto bacteriano con la superficie de electrodos, la formación de biocapas y corrosión en sistemas de almacenamiento de agua	Nel et al. (2009)
Alta conductividad	Nuevos electrodos para la electrosorción (deionización rápida) junto a costos reducidos y consumo energético eficiente en el proceso de desalinización	Oren (2008)
Fluorescencia	Detección rápida de patógenos y otros contaminantes por medio de nanosensores.	Bogue (2009)

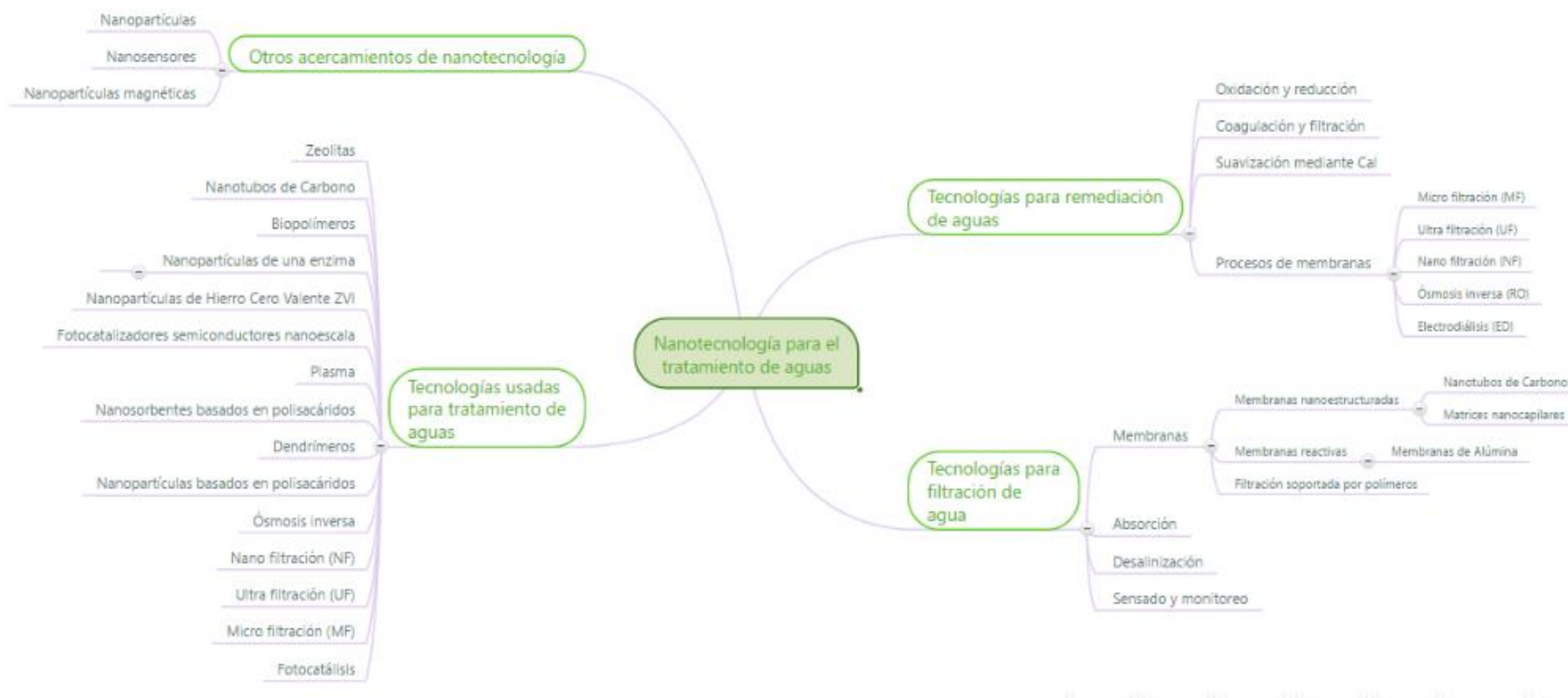
Nota. Descripción de las propiedades ideales de los nanomateriales que permiten un uso óptimo en el tratamiento de aguas residuales. Tomado de: Madhura, L., Singh, S., Kanchi, S., Sabela, M., & Bisetty, K. (2018). Nanotechnology - based water quality management for wastewater treatment. In *Environmental Chemistry Letters*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0778-8>.

4.4 Clasificación de distintas técnicas que involucran la nanotecnología en el tratamiento de aguas residuales industriales

En la Figura 16, se presentan un esquema de clasificaciones de las nanotecnologías que poseen el potencial de ser utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, incluyendo las necesidades que poseen la población Colombiana, en los cuales se profundiza en la remediación, la filtración y otras tecnologías separadas a los métodos convencionales (Echeverri et al., 2016, p. 17).

Figura 16.

Esquema de calificaciones de la nanotecnología empleada en el tratamiento de aguas.



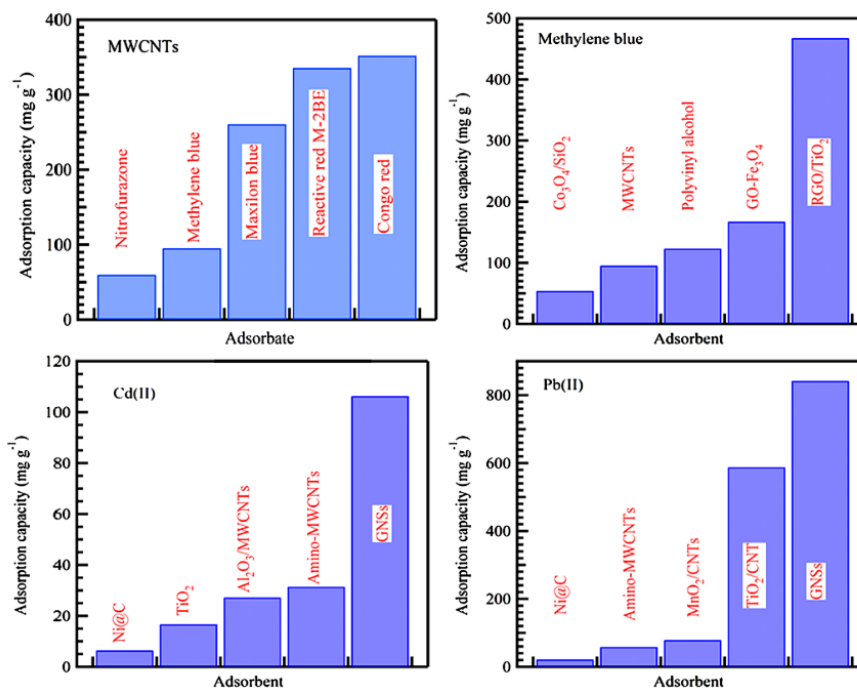
Nota. Esquema gráfico de una clasificación de la nanotecnología que puede ser utilizada en el tratamiento de aguas residuales, dada por el observatorio del concejo nacional de política económica y social en el 2016. Tomado de: Echeverri, E., Urquijo, S., Suárez, J., Hincapié, A., Quintero, O. E., Duque, A. C., Velásquez Giraldo, A. M., Díez Restrepo, A. E., & Henao Tamayo, L. (2016). OBSERVATORIO CT + i. Consejo Nacional De Política Económica Y Social, 53(1), 1–63.

4.4.1 Tecnologías para remediación de aguas

En base de a las propiedades pertenecientes a los nanomateriales se puede estudiar la posibilidad de su aplicabilidad en la remoción de metales pesados y tintes en aguas residuales; este potencial es gracias a su alta área superficial y tamaño reducido, lo que significa un número de sitios activos que pueden ser empleados en adsorción (Sadegh et al., 2017, p. 10). Las ventajas que se pueden presentar en los nanomateriales empleados en procesos de adsorción son: el hecho de que los nanomateriales en sí no son tóxicos, tienen altas capacidades de adsorción, los compuestos a nanoescala pueden ser fácilmente removidos de la superficie del nanoadsorbente y los compuestos nanoadsorbentes pueden ser reciclados para futuros usos (Soni et al., 2020, p. 189).

Figura 17.

Comparación de remoción de distintos tintes por medio de nanotubos de carbono (CNTs), junto a azul de metileno, Cd (II) y Pd (II) mediante el uso de distintos nanomateriales.



Nota. Gráfico comparativo de la eficiencia que tienen los nanotubos de carbono para remover tintes como el azul de metileno, representado a través de su capacidad de adsorción. Tomado de: Sadegh, H., Ali, G. A. M., Gupta, V. K., Makhoulf, A. S. H., Shahryari-ghoshekandi, R., Nadagouda, M. N., Sillanpää, M., & Megiel, E. (2017). The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40097-017-0219-4>.

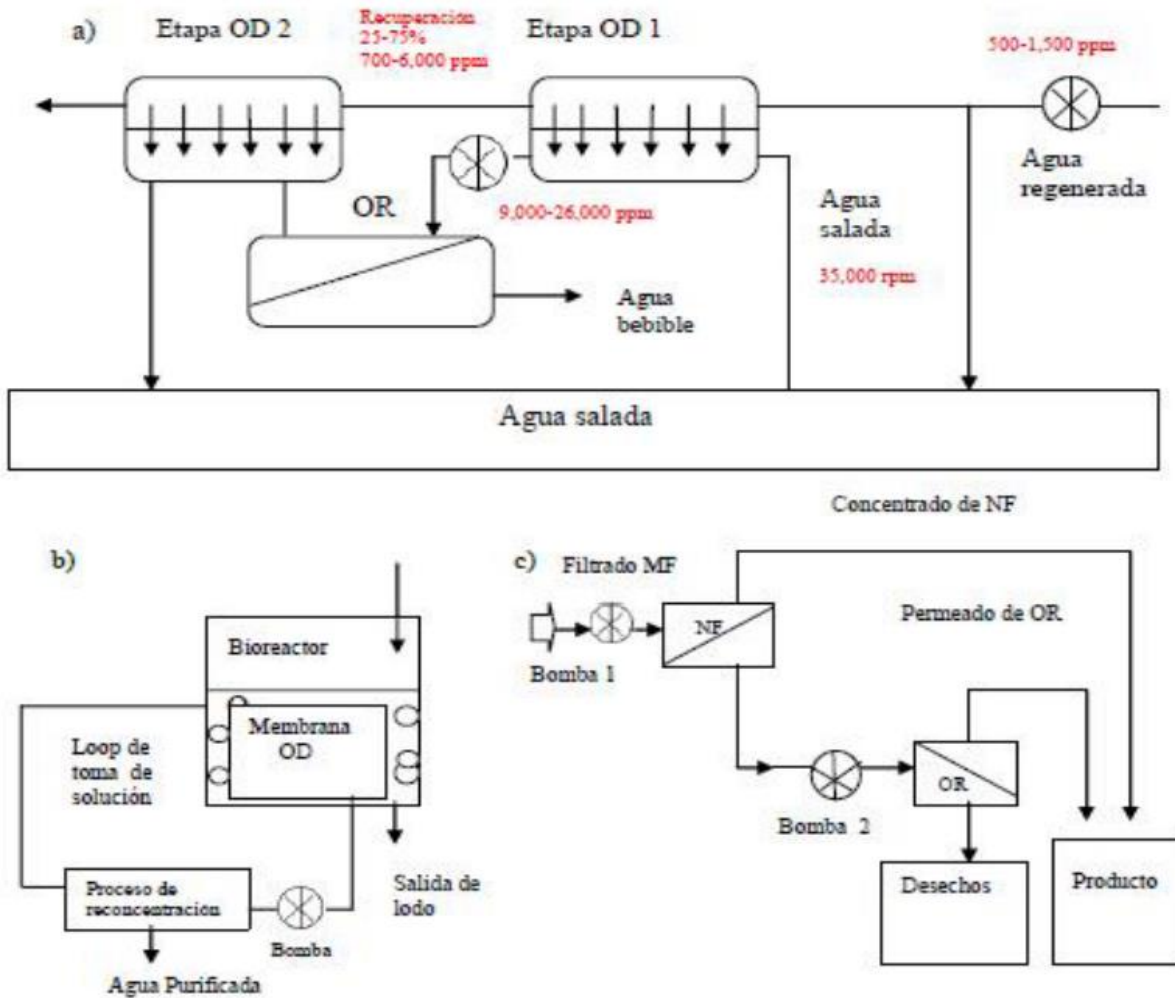
En la actualidad el proceso utilizado en la desalinización, más específicamente para agua de mar, con el objetivo de generar agua regular; este proceso excede en la actualidad los 80 millones de m³ al día, reduciendo la escasez de agua para, aproximadamente, 200 millones de personas. A pesar de esto, la baja permeabilidad, selectividad insuficiente y alta afinidad para la presencia de incrustaciones que se presentan en las membranas comúnmente utilizadas en el proceso generan la oportunidad de investigar el desarrollo de nanomateriales para siguiente generación de membranas empleadas en el proceso (Bodzek et al., 2020, p. 3).

Una herramienta de interés es el uso de nanomateriales metálicos y no metálicos como intermediario en la adsorción de metales pesados, algunos de estos materiales son el carbón activado y los nanotubos de carbón, siendo sus principales componentes regularmente compuestos no metálicos, TiO₂, MnO, ZnO y nanomateriales a base de hierro. Los compuestos no metálicos son más que nada, nanomateriales basados en grafeno y carbono con altas áreas de superficie específica, que poseen una gran cantidad de sitios para llevar a cabo la adsorción (Kamali et al., 2019, p. 263).

4.4.2 Tecnologías usadas para tratamiento de aguas

Figura 18:

Procesos innovadores para el tratamiento y recuperación de aguas residuales



Nota. Procesos innovadores para el tratamiento y recuperación de agua basada en a) ósmosis directa (OD), b) ósmosis directa en un biorreactor de membrana y c) sistema integrado de microfiltración (MF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OR). Tomado de: Chávez-Lizárraga, G. A. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 52–61. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2018.090100052>.

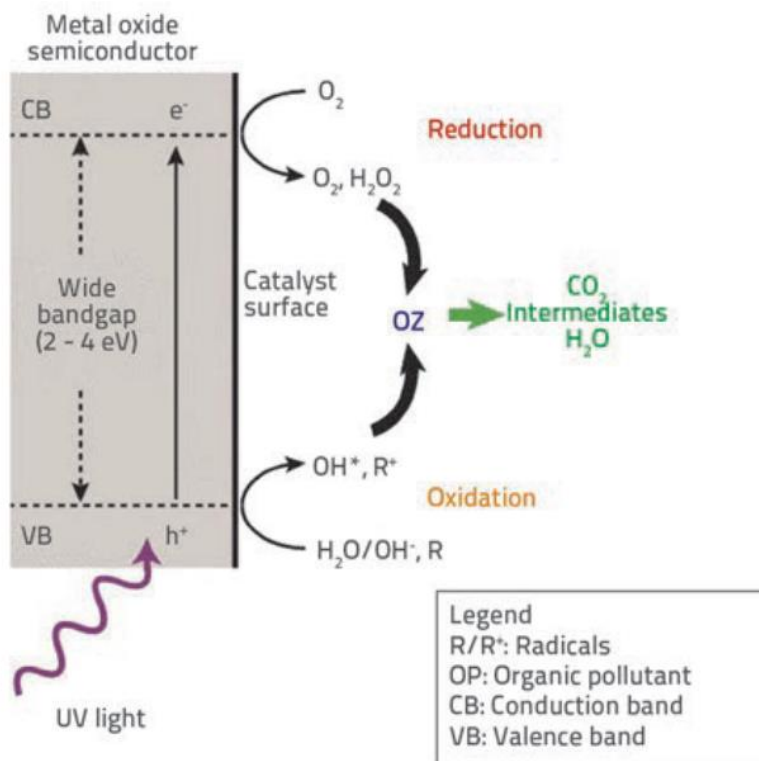
Para dar solución al problema de la contaminación en desechos vertidos al agua se han investigado muchas alternativas provenientes de la nanotecnología, sintetizando varios nanomateriales, entre muchos de estos se pueden contar los nanotubos de carbono (CNTs, por sus siglas en inglés), son

estructuras a nano escala resultantes de planos de grafeno revuelto, se pueden encontrar con una sola pared o múltiples, siendo poseedores de un rango amplio de propiedades físicas y químicas atractivas; de las cuales se resaltan su alta conductividad eléctrica y térmica, alta elasticidad y flexibilidad, un coeficiente de expansión bajo y un buen campo de emisión de electrones (Kabbashi et al., 2020, p. 2). Los nanotubos de carbono pueden ser sintetizados por diferentes métodos, entre los que se pueden mencionar el arco de descarga, ablación láser y la deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés, Chemical Vapor Deposition); siendo este último el método que posee el mayor potencial para ser utilizado para su producción a escala industrial gracias a su simplicidad, costos y las buenas propiedades morfológicas que presenta el producto (Aliyu et al., 2017; Baby, Rabia; Saifullah, 2019). Por medio de la Figura 18 se busca presentar un ejemplo gráfico sencillo de los procesos simples que se pueden llevar a cabo para realizar el tratamiento de aguas residuales, por medio de tres métodos distintos, representando la osmosis directa e indirecta, con o sin biorreactor, un sistema integrado de microfiltración, nanofiltración.

Otro método en auge, a parte de los nanotubos de carbono, es la fotocatalisis, la cual consta del estudio de reacciones fotoquímicas inducidas por la absorción de fotones en la superficie porosa de un fotocatalizador semiconductor. Se realiza principalmente haciendo uso de TiO_2 como catalizador, debido a su alta fotoactividad, baja toxicidad y estabilidad química con respecto a la remoción de compuestos orgánicos diluidos en el agua. Se usa el dióxido de titanio (TiO_2) a su ya mencionada estabilidad tanto química como fotoestable, junto a su costo económico en comparación a otras nanopartículas (Santiago Talenas, 2018, p. 41). Otra alternativa para hacer uso de la fotocatalisis haciendo uso de nanomateriales, debido a que (gracias a su tamaño, otorgando mejor superficie en proporción área-volumen, y su mayor reactividad) son más efectivos que los catalizadores convencionales (Chávez-Lizárraga, 2018; Gurushantha et al., 2017). En el proceso las parejas hoyo-electrón son generadas debajo de luz de irradiación, estos pares fotogenerados degradan las moléculas de tinte por medio de la formación de intermediarios provenientes de distintos super radicales (Mukherjee et al., 2017, p. 4).

Figura 19.

Fotocatálisis realizada en la superficie de un nanocatalizador semiconductor.



Nota. Descripción gráfica del proceso de fotocatalisis que se presenta en la superficie de un nanocatalizador que pueda funcionar como semiconductor en el proceso de remoción de contaminantes en aguas residuales. Tomado de: Zekić, E., Vuković, Ž., Halkijević, I., Zelić, E., Hidrokon doo, M., & Ivan Halkijević, A. (2018). Application of nanotechnology in wastewater treatment Authors: Subject review. Nano-Adsorbens, 4, 315–323. <https://doi.org/10.14256/JCE.2165.2017>.

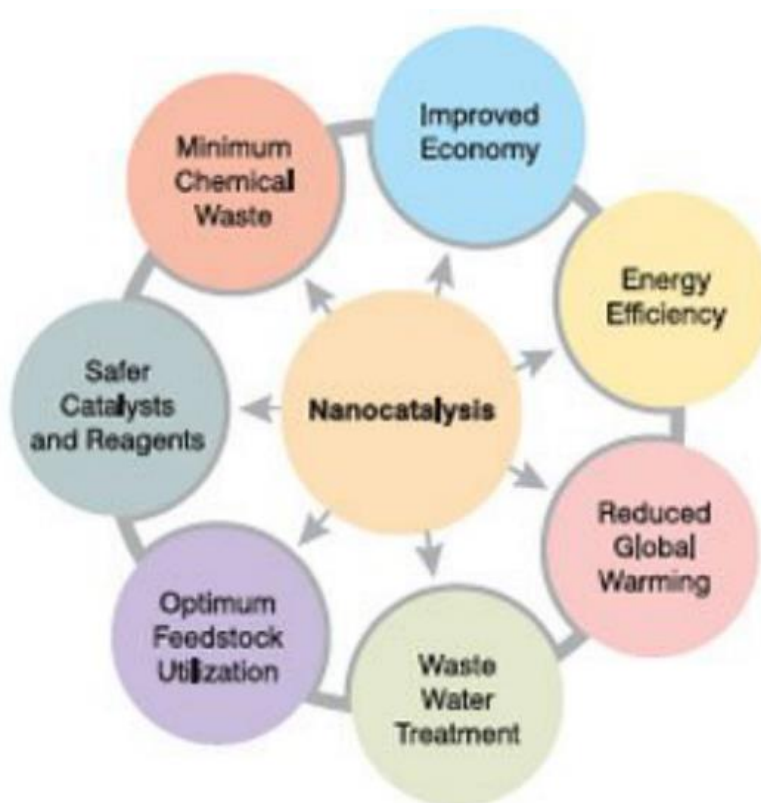
En la Figura 19, podemos observar cómo se lleva a cabo la fotocatalisis en presencia de un nanocatalizador, en cuya superficie se observa la reducción de la molécula, liberando los intermediarios como agua y el dióxido de carbono a la atmosfera, seguido de una oxidación que produce los mismos intermediarios utilizando los rayos ultravioletas como fuente energética para el intercambio de iones.

El nanocatalizador es una sustancia o material que posee propiedades catalíticas que, a su vez, poseen (al menos) una dimensión en nanoescala, que puede ser parte de la estructura interna o

externa. En términos generales los catalizadores que pueden funcionar apropiadamente en una escala atómica suelen ser denominados nanocatalizadores. Sus propiedades catalíticas pueden ser atribuidas a nanoestructura porosa, la cual posee una proporción de superficie-volumen alta, en consecuencia, aumentando su actividad catalítica (Pandey et al., 2011, p. 273). La Figura 20 muestra de manera gráfica un resumen de distintos procesos para el tratamiento de aguas residuales mediante nanocatalizadores.

Figura 20.

Métodos de tratamiento de aguas residuales en los cuales se pueden emplear nanocatalizadores.



Nota. Gráfico simplificado de los ámbitos en los cuales la influencia de nanocatálisis puede ser empleada para la optimización de cada uno de estos campos industriales. Tomado de: Pandey, J., Khare, R., Kamboj, M., Khare, S., & Singh, R. (2011). Potential of Nanotechnology For The Treatment of Waste Water. Asian Journal of Biochemical and Pharmaceutical Research, 1(2). <https://www-virtualpro-co.ezproxy.uamerica.edu.co/download/potencial-de-la-nanotecnologia-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales.pdf>.

La inmovilización de enzimas a nanoescala ha sido estudiada como un soporte para diversos procesos, de los cuales se pueden nombrar la hidrólisis de lactosa, biosensores de glucosa, agentes antimicrobianos y la terapia de enzimas pro-medicamento. La inmovilización con nanosoporte que usa métodos convencionales de inmovilizar demuestran una buena actividad en un rango más amplio de pH, al igual que mantienen buena estabilidad con respecto a cambio en la temperatura, además de, gran oportunidad para su reutilización en comparación a las enzimas libres. Incluyendo casos específicos en los que se hizo uso de una estrategia de inmovilización por medio de un híbrido de nanoflores, con el objetivo eliminar la contaminación producida por manchas de tinte en aguas residuales, obteniendo datos positivos como resultado (Wong et al., 2019, p. 5).

4.4.3 Tecnologías usadas para filtración de aguas residuales

La filtración por medio de membranas es muy importante para poder remover diversos contaminantes en el agua (Zekić et al., 2018, p. 318). Como se muestra en la Figura 21, en la actualidad existen diversas membranas creada con nanotecnología, entre estas se pueden nombrar las membranas de óxido de grafeno, membranas de nanofiltración de cerámica, nanopartículas magnéticas, membranas poliméricas con recubrimiento antiderrame (por ejemplo: cubiertas tipo cepillo de origen orgánico, membranas impregnadas con nanopartículas), compositos de membrana, entre otros (Chávez-Lizárraga, 2018, p. 55). Se espera que la aplicación de esta tecnología incremento proporcionalmente al aumento de su aceptación en el campo de tratamiento de aguas residuales, ya que, se espera que su alta eficiencia en la remoción de contaminantes de cualquier origen, junto a su selectividad con respecto a metales, su bajo costo y resistencia a incrustaciones, sean muestra suficiente del potencial que poseen (Anand, Aljo. Urawadee, Rajchakit. Vijayalekshmi, 2020; Khan et al., 2019). En la Figura 22 se presentan de forma gráfica un ejemplo de los mecanismos presentes en la nanoadsorción y en la filtración por nanomembranas.

Figura 21.

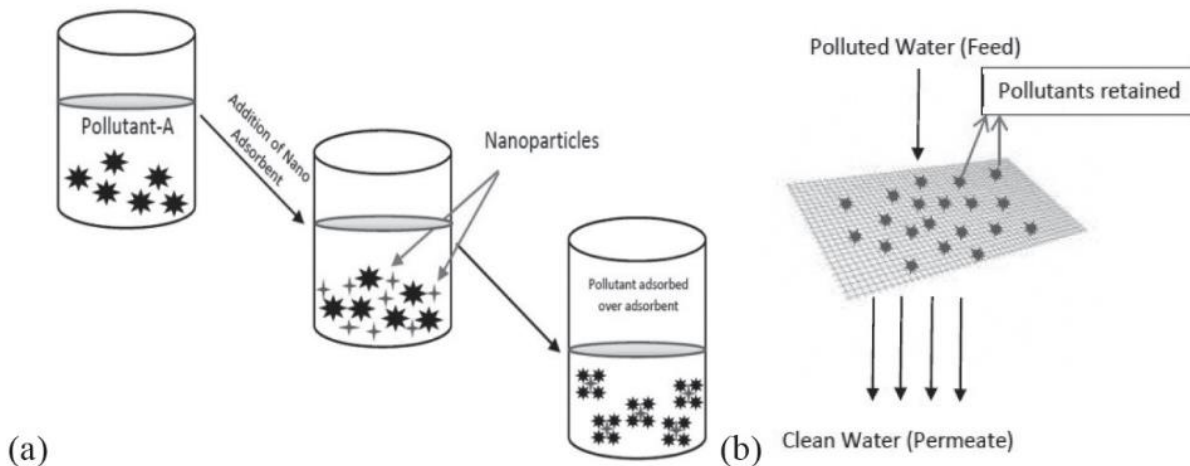
Nanotecnologías creadas por instituciones mundiales aplicadas a la filtración con nanomateriales.

No	Organización	País	Tipo de Tecnología
1	Universidad Banaras Hindu	India	Recipientes con filtros basados en nanotubos de carbono para remover contaminantes
2	Argonida	Estados Unidos	Filtros de nanofibra de óxido de aluminio desarrollados en sustrato de fibra de vidrio
3	Instituto Politécnico Rensselaer	Estados Unidos	Equipos con filtro de nanotubos de carbono para remoción de contaminantes.
4	SolmeteX	Estados Unidos	Resinas que enlazan metales pesados, para remoción de mercurio, arsénico, cianuro y cadmio de agua.
5	Universidad North West Potchefstroom	Sudáfrica	Tecnología de nanofiltración por nanomembrana.
6	Filmtec Corporation	Estados Unidos	Tecnología de nanofiltración por nanomembrana.
7	Instituto de Investigación del Agua Stephen & Nancy Grand	Israel	Osmosis reversa
8	Departamento de Agua Long Beach	Estados Unidos	Proceso de filtración de dos etapas a una relativa baja presión.
9	Instituto de Ciencia de Polímeros. Universidad de Stellenbosh	Sudáfrica	Tecnología de nanofiltración por nanomembrana.

Nota. Cuadro descriptivo de nanotecnologías desarrolladas por organizaciones globales a nivel de laboratorio las cuales tienen potencial para ser empleadas en la remoción de contaminantes encontrados en aguas residuales. Tomado de: Chávez-Lizárraga, G. A. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 52–61. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2018.090100052>

Figura 22.

Gráfica de mecanismos de remoción de contaminantes empleando nanotecnología



Nota. Representación gráfica de (a) Mecanismos de nanoadsorción y (b) Filtración de nanomembrana utilizados para la remoción de contaminantes encontrados en aguas residuales. Tomado de: Khan, N. A., Khan, S. U., Ahmed, S., Farooqi, I. H., Dhingra, A., Hussain, A., & Changani, F. (2019). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment: A review. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 16(4), 81–86. <https://doi.org/10.3233/AJW190051>

Las membranas de grafeno son buenas opciones debido a las propiedades de permeabilidad que poseen, aunque se ve perjudicada por sus altos costos de producción actual. Otra opción son las membranas de cerámica, las cuales ofrecen alta resistencia en presencia de oxidantes, luz ultravioleta, junto a condiciones extremas de operación. Finalmente las nanopartículas de plata y titanio pueden ser incorporadas en membrana con el objetivo de reducir el derrame presentado en membranas poliméricas (Chávez-Lizárraga, 2018, p. 55).

La nanofiltración, es un tratamiento a alta presión con membranas que, a diferencia de la ósmosis inversa, requiere una presión baja de distensión (entre 7 a 14 bar), por lo cual permite un consumo de energía menor. El agua producida por la nanofiltración cumple con los altos requerimientos necesarios para la reutilización de ésta misma, haciendo este proceso más sencillo es el hecho de que las sustancias inorgánicas y orgánicas son fácilmente removidas, junto a bacterias y virus (Zekić et al., 2018, p. 318). En la Tabla 1 se presenta la eficiencia que posee la nanofiltración para remover en su totalidad los distintos contaminantes que pueden presentarse en las aguas residuales.

Tabla 1.

Eficiencia de remoción por medio de nanofiltración.

Contaminante	Unit	Eficiencia de remoción
Sólidos disueltos totales	%	40-60
Carbón orgánico total	%	90-98
Tinte	%	90-96
Dureza	%	80-85
NaCl	%	10-50
Sulfato-sodio	%	80-95
Cloruro-calcio	%	10-50
Sulfato-magnesio	%	80-95
Nitratos	%	80-95
Fluoruros	%	10-50
Arsénico	%	<40
Atrazina	%	85-90
Proteínas	log	3-5
Bacterias	log	3-6

Tabla 1. (Continuación)

Contaminante	Unit	Eficiencia de remoción
Protozoarios	log	>6
Virus	log	3-5

Nota. Tabla resultante de un artículo que llevó a cabo un análisis de la remoción de distintos contaminantes encontrados comúnmente en aguas residuales por medio de una nanofiltración. Tomado de: Zekić, E., Vuković, Ž., Halkijević, I., Zelić, E., Hidrokon doo, M., & Ivan Halkijević, A. (2018). Application of nanotechnology in wastewater treatment Authors: Subject review. Nano-Adsorbens, 4, 315–323. <https://doi.org/10.14256/JCE.2165.2017>.

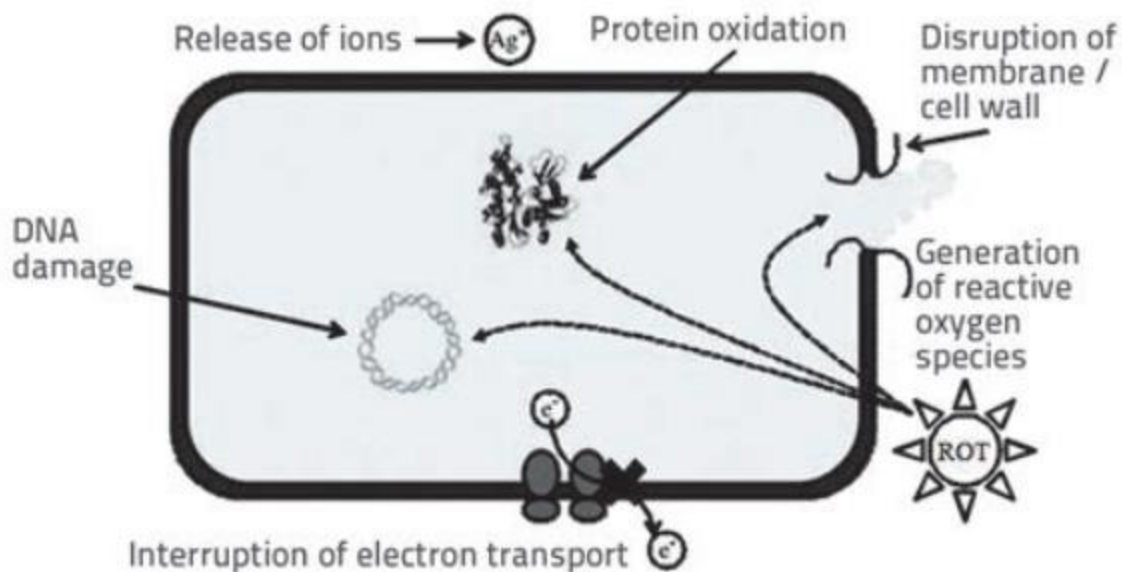
4.4.4 Otros acercamientos de la nanotecnología

Usos particulares de nanopartículas individuales como herramientas para el tratamiento de aguas se debe a sus propiedades particulares que aportan grandes ventajas al momento de ser empleadas, por ejemplo, uno de los materiales mayormente usados en la ciencia de materiales son las nanopartículas de óxido de cinc (ZnO) debido a su capacidad de ser biocompatible, amigable con el medio ambiente, baja en costo y naturaleza no tóxica. Dentro de sus aplicaciones se pueden resaltar su funcionalidad como catalizadores en procesos de tratamiento de aguas residuales, cosméticos y aditivos antimicrobios (Shaba et al., 2021, p. 23).

Un acercamiento interesante que presentan los nanomateriales es su uso en actividades de eliminación de microbios, gracias a sus mecanismos de adaptación presentes en cualquier interacción con microbios, pueden destruir estos últimos al entrar en contacto directo con ellos, interrumpiendo la transferencia de electrones transmembranal, o al dañar su envoltura celular. A su vez, pueden eliminar microbios de manera indirecta al oxidar sus componentes. Para este caso de actividad antimicrobiana se pueden usar diversas nanopartículas como partículas de plata, óxido de titanio (TiO₂), óxido de zinc (ZnO), fullerenos, nanotubos de carbón (CNTs), quitosano, entre otros (Cheriyamundath & Vavilala, 2020, p. 11). Todos los mecanismos descritos en el párrafo se pueden observar de manera gráfica y suscita en la Figura 23, en la cual se observan tanto el proceso de disrupción de la membrana, como la oxidación de los componentes del microbio.

Figura 23.

Mecanismos de actividad antimicrobial perteneciente a los nanomateriales.



Nota. Descripción gráfica de la oxidación de un contaminante (proteína en este caso) la cual se puede ejecutar mediante el uso de nanotecnología. Tomado de: Zekić, E., Vuković, Ž., Halkijević, I., Zelić, E., Hidrokon doo, M., & Ivan Halkijević, A. (2018). Application of nanotechnology in wastewater treatment Authors: Subject review. Nano-Adsorbens, 4, 315–323. <https://doi.org/10.14256/JCE.2165.2017>.

Otra alternativa innovadora estudiada ha sido la creación de membranas de intercambio de protones las cuales involucran membranas compuestas de nanopartículas poliméricas/inorgánicas gracias a otorgar la posibilidad de caminos de permeación más sencillos, en comparación a los materiales tradicionales utilizados en la creación de celdas de combustible microbianas, esto mejora el proceso de separación que ocurre en la celda (Salar-García & Ortiz-Martínez, 2019, p. 344).

4.5 Variables críticas para el tratamiento de aguas residuales por medio de nanotecnologías aplicables

La matriz de PUGH de toma de decisiones se trata de una técnica cuantitativa empleada para clasificar distintas opciones en base a diversos criterios de análisis, esta puede ser aplicable en varias situaciones dentro de la gestión de proyectos. A su vez, esta herramienta permite comparar

diversas opciones entre sí por medio de un análisis multidimensional. Gracias a estas propiedades se puede afirmar que esta matriz ayuda a que la persona que elabora la matriz tenga la capacidad de identificar las limitaciones y criterios requeridos para desarrollarla de manera adecuada (Arboleda T. & M., 2020, p. 12). Una metodología de matriz de decisión contempla una definición de los atributos de evaluación y su peso, un cálculo de puntajes y un establecimiento de rankings entre las soluciones técnicas consideradas. Las filas y columnas de la tabla corresponden a criterios de juicio y procesos alternativos, respectivamente (es posible ampliar más las opciones a través de un ejercicio de lluvia de ideas). Los criterios de selección para juzgar las opciones pueden ser varios tipos de costos o pérdidas, así como beneficios, entre otros. La importancia relativa de cada criterio se pondera en función del sentimiento de equipo, mientras que el análisis de una matriz de decisión permite identificar los componentes y factores con mayor influencia en los resultados, siendo la solución con la puntuación más alta seleccionada como la mejor. Varias ramas de la ingeniería utilizan una metodología de matriz de decisión (Navas & Braga, 2011, p. 140).

El primer paso para desarrollar la matriz PUGH (ANEXO 1, ubicado en **ANEXOS**) consiste en llevar a cabo una identificación de los criterios a evaluar, los cuales suelen ser identificados como las necesidades del cliente, siendo en este caso las variables calificativas de los criterios seleccionados y están ubicados, como usualmente ocurre, en las filas pertinentes a la matriz. A su vez, se deben especificar los probables conceptos de diseño, para el caso a cuestión son las variables críticas para el tratamiento de aguas residuales, estas serán ubicadas en las columnas de la matriz. , la evaluación de las variables se lleva a cabo mediante la asignación de tres posibles valoraciones a cada una de las variables a calificar, estas valoraciones son: 1, 0 y -1, en donde 1 representa la variable más relevante para el criterio evaluador; 0 la variable que muestra equivalencia entre su importancia al momento de ser calificada por un criterio evaluador; y por último, -1 que representa la variable peor adecuada ser considerada como una variable crítica del proceso (Cadena M. & A., 2022, p. 53).

La matriz PUGH resultante permite concluir que la eficiencia de remoción de los contaminantes pertinentes es una variable crítica al momento de seleccionar la técnica de tratamiento de aguas residuales. Ya que es imprescindible para establecer el comportamiento de los determinantes de calidad del agua, debido a que el objetivo fundamental del tratamiento de las aguas residuales es producir un efluente que pueda ser descargado un cuerpo de agua sin causar impactos significativos atribuibles a la carga contaminante presente en este efluente. Ello supone alcanzar unos determinados rendimientos o tasas de eliminación de dichos contaminantes. Entonces, el rendimiento o eficiencia de remoción se puede identificar como la diferencia entre los valores de la concentración del sustrato a la entrada y a la salida de un proceso específico, o a la salida de una planta depuradora (Nuñez F., 2019, p. 18).

A su vez, mediante la matriz PUGH, indica que los costos atribuibles al área de mantenimiento, la viabilidad y el control y análisis de los procesos de la aplicación de la técnica de tratamiento son variables críticas al momento de seleccionar dicha técnica. A pesar de que el costo de inversión inicial tiene gran importancia al momento de seleccionar una alternativa para el tratamiento de aguas los criterios de calificación utilizados nos obligan a ponderar el hecho que el impacto de la inversión inicial puede ser amortiguado mediante distintos medios de financiación o subsidios, mientras que el costo de mantenimiento es un costo que debe ser asumido por la empresa que opera la planta. Los costos más representativos de operación y mantenimiento de sistemas convencionales que se pueden resaltar son el funcionamiento de los procesos de automatización y el control, en el caso de que sea pertinente, de los equipos de bombeo y los insumos químicos necesarios para el tratamiento (Salas-Quintero et al., 2007, p. 595). Los cuales son principalmente dictados por las características de los efluentes producidos, siendo estas características muy diversas, destacando el hecho de ser más comúnmente alcalinas, coloreadas y a presentarse a temperaturas relativamente altas. A su vez, los principales contaminantes presentes en estos efluentes son sólidos suspendidos, aceites minerales, colorantes y compuestos orgánicos (Gilpavas, 2020, p. 4).

La última variable categorizada como crítica por la matriz PUGH fueron los aspectos ambientales asociados a la localización de la planta de proceso, estos tienen gran significancia ya que es una obligación que cualquier empresa operando en una ubicación específica en el mundo debe seguir

los parámetros asignado por entes gubernamentales nacionales e internacionales que regulan las composiciones y concentraciones que deben tener tanto los productos creados como los residuos que se pueden generar, ya sean desechos sólidos o fluidos.

4.6 Secuencia de tratamiento de aguas residuales en el sector textil mediante técnicas con nanotecnología aplicada

En busca de hablar de la posibilidad de aplicar un proceso de tratamiento de aguas residuales ayudado por nanotecnología debemos conocer la situación en la que actualmente se presenta el sector textil en Colombia, en la actualidad la producción y comercialización de productos textiles comprende aproximadamente el 1% del Producto Interno Bruto (PIB) del país, al igual que un 5.8% del PIB industrial, estos datos dan a entender que cerca de cuatro millones de familias con influenciadas por la industria. En un ámbito global, Colombia se ubica entre los primeros 50 países en términos de exportación de productos textiles tales como pantalones, trajes, camisetas y ropa interior. Acorde a la asociación nacional de empresarios de Colombia (ANDI), el sector textil posee un gran potencial para prosperar y consolidar su posición en el mercado internacional debido a la fuerte red empresarial disponible en el país (Gilpavas, 2020, p. 2). En un estudio realizado por la ANDI acerca del manejo de aguas residuales por la industria textil se encontró lo siguiente:

- El 8.5% poseen algún sistema de tratamiento de aguas residuales.
- El 8.5% entregan las aguas residuales a un tercero.
- El 25% no tienen un sistema para la gestión o tratamiento de aguas residuales.
- El 25% no generan aguas residuales.
- El 33% solo cuentan con trampas de grasas y sólidos.

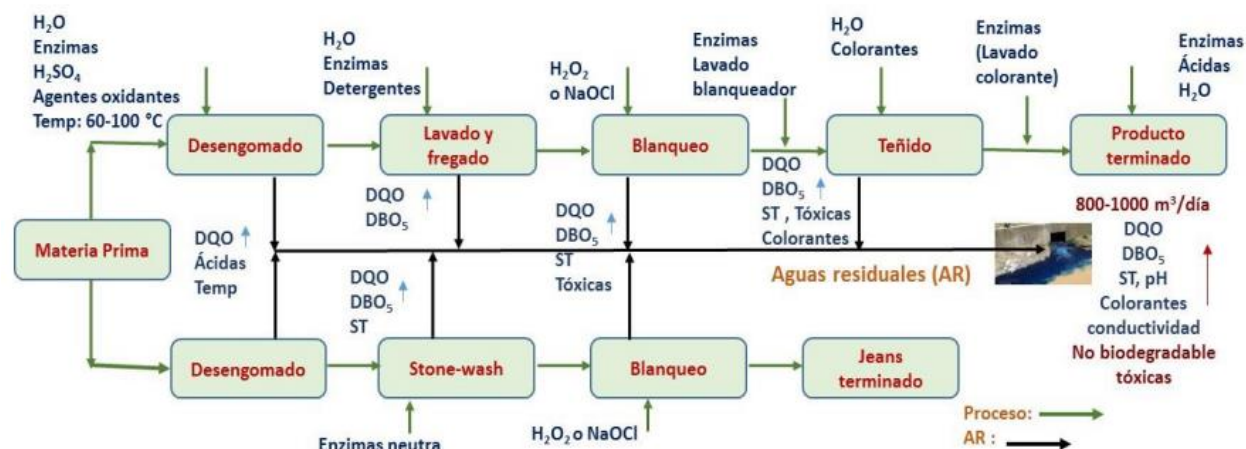
Para conocer como seria la secuencia de tratamiento de aguas residuales de la industria textil se puede hacer un estudio de la tesis publicada por (Gilpavas, 2020), en la cual se lleva a cabo el modelamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales enfocada en el procesamiento de efluentes provenientes de la industria textil. Como inicio el autor planteó la figura 24, la cual nos presenta de manera gráfica un bosquejo básico de las diferentes etapas de producción que se

pueden encontrar en la industria textil. A su vez, en esta figura se muestran los posibles vertimientos respectivos de cada etapa estudiada.

En la tabla 2 se presenta una caracterización promedio del agua residual estudiada en la tesis junto a las condiciones que el sector textil tiene permitidas para sus efluentes.

Figura 24.

Proceso genérico de la industria textil



Nota. Diagrama de bloques del proceso de producción de textiles, el cual incluye información de contaminantes principales en cada una de sus etapas al igual que la salida de aguas residuales. Tomado de: Gilpavas, E. (2020). Procesos Avanzados de Oxidación para la degradación de índigo y materia orgánica de aguas Residuales de una Industria textil [Universidad Nacional de Colombia]. In Departamento de Ingeniería Química. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78505>.

Tabla 2.

Caracterización de contaminantes permitidas por la normativa colombiana.

Parámetro	Método*	Valor promedio	Límite permisible
Temperatura (°C)	-	40 ± 2	40
pH	4500-H B	8.2 ± 1.1	6-9
Conductividad (mS/cm)	2510 B	4 ± 1.6	-
Turbidez (NTU)	2130 B	270 ± 150	-
DQO (mg O ₂ /L)	5220 D	860 ± 140	400
COT (mg O ₂ /L)	5310 D	225 ± 65	-
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	5210 B	150 ± 60	200
Sólidos Totales (mg/L)	2540 D	1450 ± 854	2

Tabla 2. (Continuación)

Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	2540 D	430 ± 70	50
Fenoles (mg/L)	Método colorimétrico: Macherey Nagel 91875	12 ± 4	0.2
Compuestos orgánicos halogenados (AOX) (mg/L)	Método colorimétrico: Macherey Nagel 985007	13.5 ± 3	-
Cloruros (mg Cl ⁻ /L)	Método Argentométrico	2340 ± 415	1200
Sulfuros (S ²⁻)(mg/L)	4500-S ²⁻ I	0	1
Sulfatos (SO ₄) ²⁻	4500-SO ₄ ²⁻ C	675 ± 40	-
Hierro Total (mg Fe ³⁺ /L)	Método Fenantrolina	8.0 ± 1	-
Cadmio (Cd) (mg/L)	3500-Cd	0.48 ± 0.05	0.02
Cinc (Zn) (mg/L)	3500-Zn	3.2 ± 0.07	3.0
Cobalto (Co) (mg/L)	3500-Co	0	0.5
Cobre (Cu) (mg/L)	3500-Cu	0	1.0
Cromo total (Cr) (mg/L)	3500-Cr B	0.08 ± 0.08	0.5
Níquel (Ni) (mg/L)	3500-Ni	0	0.5
Nitratos (mg nitratos/L)	Método Fotométrico	2.3 ± 0.4	A.R
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ /L)	Método Fotométrico	0.07 ± 0.01	-
Nitrógeno total (mg/L)	4500-N B	125 ± 30	A.R
Ortofosfatos (mg PO ₄ ³⁻ /L)	Método Ortofosfatos	8.5 ± 1.5	A.R
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻)	Método Turbidimétrico	274.5 ± 48.5	A.R
Absorbancia (660 nm)	-	1.9 ± 0.5	-
Color real (mg Pt-Co/L) λ=436,525,620 nm/m	ISO 7887:2012-04 Método B, C	1,712 ± 438 C	A.R
		λ ₄₃₆ = 60 ± 10 B λ ₅₂₅ = 65 ± 10 λ ₆₂₀ = 68 ± 15	
DBO ₅ /DQO	DBO ₅ /DQO	0.16 ± 0.04	-
Acidez Total (mg CaCO ₃ /L)	2310 B	38 ± 8	A.R
Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)	2320 B	290 ± 50	A.R
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	2340 C	150 ± 40	A.R
Coliformes Totales/ Fecales, UFC/mL)	9222 B	0/0	-
Salmonella spp (UFC/mL)	9620 D	0	-
Toxicidad	% mortalidad <i>Artemia spp</i>	100	-

*APHA, 2012.

A.R.: Análisis y Reporte

Nota. Tabla resultante de la caracterización contaminantes encontradas en el efluente tratada mediante nanotecnología aplicada comparada con los parámetros legales dictados por la normativa colombiana. Tomado de: Gilpavas, E. (2020). Procesos Avanzados de Oxidación para la degradación de índigo y materia orgánica de aguas Residuales de una Industria textil [Universidad Nacional de Colombia]. In Departamento de Ingeniería Química. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78505>.

En la secuencia tomada por la tesis del doctor (Gilpavas, 2020) se estudiaron a profundidad las distintas técnicas de tratamiento de aguas residuales que previamente fueron mencionadas en este documento. Mediante este estudio se pudo observar que cada uno de los sistemas de tratamiento evaluados en esta Tesis. Se observa claramente que, para la transformación de la carga orgánica, comprendida por la demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT) y demanda biológica de oxígeno (DBO₅) cada uno de los procesos evaluados cumple con la legislación ambiental colombiana. Sin embargo, para los procesos electroquímicos, los cuales fueron la coagulación química (CQ) junto a la electro-oxidación (EO) y la electrocoagulación (EC) en conjunto a la electro-oxidación (EO), la toxicidad no disminuyó con respecto a la de la muestra inicial, además que los costos de operación resultaron mayores que los procesos Fenton, estos últimos fueron compuestos por una coagulación química (CQ) junto a un proceso Fenton simple (F) y una coagulación química (CQ) en conjunto a un proceso de foto-Fenton (FF). Además de esto el autor pudo concluir que su viabilidad tecnológica, con respecto a su implementación, mantenimiento y operación, es más compleja que para los procesos fisicoquímicos secuenciales de coagulación-Fenton (Gilpavas, 2020). Esta información se muestra de forma simplificada y definida en la Tabla 3.

Tabla 3.

Comparación de los resultados de los sistemas de tratamiento evaluados.

Parámetro	Eficiencia de remoción					
	CQ+F	CQ+FF	EC+F	EC+FF	CQ+EO (30 min)	EC+EO (30 min)
pH	-	-	-	-	-	-
Conductividad (mS/cm)	-	-	-	-	-	-
Turbidez (NTU)	97	100	96	97	100	96
DQO (mg O ₂ /L)	75	86	72	76	85	85
COT (mg O ₂ /L)	67	76	75	78	69	69
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	25	27	44	47	57.5	58
Sólidos Totales (g/L)	86	91	100	100	100	100
Absorbancia (660 nm)	99.25	100	100	100	100	96
Color Real (mg Pt-Co/L, C) ISO 7887:2012-04 (B,C) $\lambda=436-525-620$ nm (m ⁻¹ ,B)	80	85	80	85	96	87
	87 (λ_{436}) 94 (λ_{525}) 97 (λ_{620})	91 (λ_{436}) 95 (λ_{525}) 97 (λ_{620})	88 (λ_{436}) 93 (λ_{525}) 94 (λ_{620})	92 (λ_{436}) 94 (λ_{525}) 96 (λ_{620})	97 (λ_{436}) 98 (λ_{525}) 99 (λ_{620})	93 (λ_{436}) 97 (λ_{525}) 99 (λ_{620})
DBO ₅ /DQO	>0.4	>0.4	>0.4	>0.4	>0.4	>0.4

Tabla 3. (Continuación)

Parámetro	Eficiencia de remoción					
	CQ+F	CQ+FF	EC+F	EC+FF	CQ+EO (30 min)	EC+EO (30 min)
%Remoción toxicidad	90	100	20	60	0	0
Costos Operación (USD/m ³)	1.24	2	1.53	1.96	4.79	2.98
Viabilidad tecnológica	++++	+++	++	++	+	+

+: A mayor número de (+) mayor viabilidad tecnológica.

Nota. Tabla comparativa de la eficiencia de remoción de contaminantes por medio de las distintas técnicas que emplean nanotecnología como la coagulación química (CQ), los sistemas Fenton y foto-Fenton (F Y FF, respectivamente), electrocoagulación (EC) y la electro-oxidación (EO). Tomado de: Gilpavas, E. (2020). Procesos Avanzados de Oxidación para la degradación de índigo y materia orgánica de aguas Residuales de una Industria textil [Universidad Nacional de Colombia]. In Departamento de Ingeniería Química. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78505>.

Mediante este análisis (Gilpavas, 2020) decidió que el proceso de coagulación química con Fenton (CQ+F) era el indicado para ser seleccionado con el propósito del tratamiento de las aguas residuales textiles bajo estudio. Esto debido a que permite cumplir con las exigencias de la legislación ambiental, además de ser el proceso que manifiesta menores costos de operación junto a su diseño, implementación y puesta en marcha fue la opción de menor complejidad. A su vez, después de un análisis de viabilidad el autor pudo concluir que el proyecto es viable tecnológica y económicamente para un sistema de tratamiento que consistirá en 15 lotes/día, cada lote de 90 minutos cada uno, durante 24 horas/día, en tres turnos de 8 horas. Los costos totales de inversión para implementar la planta de tratamiento de las aguas residuales textiles fueron de 958095 USD. Mientras que se compararon los costos que se generarían por la disposición final de los vertimientos líquidos mediante su tratamiento por EPM (empresas públicas de Medellín) y los vertimientos originados con la puesta en marcha del sistema propuesto, teniendo esto en mente el autor recurrió al cálculo del Costo Anual Equivalente (CAE), el cual entregó valores de 485365 y 886239 USD/año para la PTAR y por pagar por su tratamiento, respectivamente.

Esta información es pertinente en cualquier caso de estudio que pretenda estudiar la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del sector textil que emplee una alternativa asistida con nanotecnología ya que nos enseña un análisis y comparación a detalle de los métodos de tratamiento de estas aguas, proponiendo la coagulación química ayudada

del método Fenton como la mejor alternativa. Esto abre la posibilidad de llevar a cabo una investigación que profundice en la logística que implica la aplicación de esta tecnología en la metodología de coagulación-Fenton, incluyendo la viabilidad de ser aplicable a la metodología o el estudio de otras alternativas metodológicas que utilicen nanotecnología. A su vez, se debe enfocar en dicho estudio la viabilidad del proyecto a escala industrial.

Además de los aspectos técnicos que deben considerarse al estructurar el proceso de tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria textil se deben considerar las normas ambientales impuestas por el gobierno colombiano que sopesan los parámetros establecidos para la generación de vertimientos, ya que los valores dictados en estas normas nos servirán como una meta a alcanzar al someter a las aguas a tratamiento. La norma de vertimientos, la Resolución 0631 de 2015 reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984 respondiendo a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país. Esta permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país, además de 56 parámetros a cumplir por parte de las actividades industriales, comerciales y de servicios del país. Esta Resolución es de obligatorio cumplimiento para todas aquellas personas que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios y que en el desarrollo de estas generen aguas residuales, que serán vertidas en un cuerpo de agua superficial o al alcantarillado público. Más específicamente la resolución número 0631 del 17 de marzo de 2015 está enfocada en reducir el aporte de las sustancias contaminantes a los cuerpos de agua, con el objetivo de que los generadores de vertimientos gestionen adecuadamente los mismos, y facilitar a las autoridades ambientales el control sobre los vertimientos de los diferentes procesos productivos en el país y obtener una mejora en la calidad de los vertimientos, para conseguir esto se incorpora la diferenciación entre las aguas residuales domésticas (ARD), y las aguas residuales no domesticas (ARnD), para claridad de los usuarios en cuanto al cumplimiento de la norma. A su vez, expresa los valores límites máximos permisibles de concentración en “mg/l” para un control directo en el vertimiento, en cuanto a mecanismos de medición, a diferencia del Decreto 1594 de 1984, el cual los expresaba en carga contaminante vertida mediante “kg/día” (ACUATECNICA, 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.). Para el caso específico del sector textil las concentraciones indicadas se encuentran en el artículo 13 de la norma 0631 del 2015.

5. CONCLUSIONES

La nanotecnología es un campo de la ciencia que con el paso de los años ha demostrado poseer un gran potencial como alternativa tecnológica sostenible, gracias a que continuamente se desarrollan mejoras en los sistemas de filtración que emplean membranas las cuales, no solo disminuyen en tamaño de apertura, sino en selectividad y duración. El único defecto que presenta esta alternativa es que el costo de implementación actual es elevado en comparación con otros métodos de tratamiento de aguas a gran escala, esto presenta otro aspecto el cual es la importancia de mantenerse al corriente con los avances mientras se intenta de replicar experiencias exitosas en otros países en Colombia. País en el cual, en el caso hipotético de implementar una planta de aguas residuales que trate efluentes provenientes de la industria textil, podría aplicar para optar beneficios como lo pueden ser benéficos tributarios, exclusión en el pago de IVA y cofinanciación en la implementación de la PTAR por recaudo de tasas retributivas. Avances en mejoras de procesos que involucran la desalinización podría ser utilizado en un futuro cercano, particularmente para poblaciones donde el acceso al agua es limitado ya que no es suficiente implementar dispositivos que retienen grandes cantidades de agua, sino que se debe a su vez asegurar que la buena calidad del agua para garantizar que sea apta para el consumo, razón por la cual los procesos de catálisis y fotocátalisis usando nanopartículas pueden ser utilizados.

La implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales que emplee nanotecnología de alguna forma está en un periodo de estudio y desarrollo, a pesar de que en el mundo se ha estudiado este tema desde hace, aproximadamente, tres décadas; el avance alcanzado se ha presentado principalmente en escala de laboratorios, con la presencia de casos particulares que han estudiado la viabilidad de proyectos con cargas a escala piloto. Estas dificultades se presentan debido a que las características de las aguas residuales generadas en una planta textil dependen de las operaciones específicas que se realicen, como el tipo de fibra tratada y la maquinaria a utilizar. A pesar de la gran variedad de procesos y de productos químicos utilizados, las aguas residuales producidas en la industria textil exhiben características comunes entre sí, causando que sus efluentes sean caracterizados por una gran variabilidad del caudal producido y de carga contaminante encontrada en dicho efluente, al igual que un contenido variable de sólidos en suspensión y coloides. Generalmente se presentan con tintes diluidos, dándoles distintas

coloraciones, su carga orgánica promedio es aproximadamente el doble que el encontrado en el agua residual urbana, conteniendo comúnmente productos tóxicos ocasionando que esta no sea biodegradable. A su vez, suelen ser deficientes en contenido de nutrientes, particularmente el nitrógeno. Motivo por el cual, el tratamiento de estas aguas residuales representa un desafío para la protección del recurso hídrico debido a los altos contenidos de colorantes, como la carga orgánica (DQO, COT, DBO5 etc) y materia no biodegradable. Razón por la cual se puede concluir que los sistemas de tratamientos de aguas residuales convencionales manifiestan inconvenientes en su eficiencia, resaltando como ejemplo la coagulación química (CQ); esta presenta limitaciones por su escasa eficiencia en la remoción de materia orgánica, no ocasionando una mejora a la biodegradabilidad de los efluentes a los límites exigidos por la legislación ambiental requerida. Al igual que, los procesos biológicos (como los lodos activados) no son idóneos para este tipo de aguas debido a que son no biodegradables y altamente tóxicas (Gilpavas, 2020, p. 254).

Estudios previos han concluido a la coagulación combinada con un proceso Fenton como el método de tratamiento de aguas residuales más apto para tratar los efluentes que provienen de la industria textil, gracias a su capacidad de degradación de la materia orgánica, costos de operación y viabilidad tecnológica.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda estudiar nanotecnología que pueda ser utilizada en los procesos de coagulación química o los métodos Fenton, en busca de mejorar la eficiencia de estos procesos en la remoción de los contaminantes característicos que comúnmente se encuentran en los vertimientos de la industria textil. Para esto cabe considerar una evaluación de la sostenibilidad ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) de estas metodologías, con el fin de valorar las cargas ambientales asociadas al sistema de tratamiento y energía, junto a las emisiones al entorno relacionadas con el proceso de tratamiento de aguas residuales; y de esta manera buscar determinar el impacto ambiental que ocasionan abriendo la posibilidad a un análisis que permita determinar las posibles optimizaciones de funcionamiento del proceso, así como para poder comparar los resultados de esta metodología en comparación a otros sistemas de tratamiento.
- Se recomienda llevar a cabo una investigación de la capacidad que tienen las técnicas de tratamiento de aguas residuales ayudadas con nanotecnología en escala industrial, en busca de conocer su viabilidad como tecnología alternativa.
- Se recomienda estudiar el potencial de reutilización dentro de la industria textil, ya que permitiría reducir drásticamente el consumo de agua. Para esto cabe resaltar que los requisitos de calidad del agua en la industria textil son diversos ya que dependen del tipo de materia prima y el proceso específico de fabricación de textiles, en las etapas de teñido, impresión y enjuague final se requiere agua de alta calidad; mientras que en las etapas de descolado, mercerización, lavado, decoloración y acabado, es necesario usar agua de calidad moderada, mientras que se puede usar agua de baja calidad para el lavado de equipos, el lavado de pantallas en trabajos de impresión y el lavado de recipientes y pisos (Gilpavas, 2020). Entonces un estudio que analice la medida de reutilización debe investigar a profundidad las facilidades o dificultades que cada etapa del proceso de operación presenta para tratar el agua empleada en el mismo y ser reutilizada posteriormente.

BIBLIOGRAFIA

- Central Pollution Control Board. (1999-2000). *Pollution status in Kanpur city of India*.
- Horrocks, A. R. (2000). *Handbook of technical textiles*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier.
- Mohammad Aslam Uqaili, K. H. (2011). *Energy, Environment and Sustainable Development*. Amsterdam, the Netherlands: Springer Science & Business Media. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Energy_Environment_and_Sustainable_Devel.html?id=rndnOvfTDW4C&redir_esc=y
- Niraj S. Topare, S. A. (2021). Adsorption of textile industry effluent in a fixed bed column using activated carbon prepared from agro-waste materials. *Materials Today: Proceedings*, 43, 530-534. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.029>
- Runlin Han, e. a. (2020). Application of Mn₃O₄ nanowires in the dye waste water treatment at room temperature. *Separation and Purification Technology*, 234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116119>
- ACUATECNICA. (2019). *Normatividad sobre aguas residuales en colombia*. <https://acuatecnica.com/cual-es-la-normatividad-vigente-sobre-aguas-residuales-en-colombia/>
- Albukhari, S. M., Ismail, M., Akhtar, K., & Danish, E. Y. (2019). Catalytic reduction of nitrophenols and dyes using silver nanoparticles @ cellulose polymer paper for the resolution of waste water treatment challenges. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 577(May), 548–561. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.058>
- Aliyu, A., Kariim, I., & Abdulkareem, S. A. (2017). Effects of aspect ratio of multi-walled carbon nanotubes on coal washery waste water treatment. *Journal of Environmental Management*, 202, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.011>
- Alonso, M. L. F., Antonio, G. A. J., Humberto, S. T., & Carlos, D. D. (2018). Experimental estimation of structures impact pressure of a granular debris flow. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(1), 157–161. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>
- Alvarez, P. J. J., Chan, C. K., Elimelech, M., Halas, N. J., & Villagrán, D. (2018). Emerging opportunities for nanotechnology to enhance water security. *Nature Nanotechnology*, 13(8), 634–641. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0203-2>
- Amaya, Wilson. Cañon Óscar. Avilés, Ó. (2004). Control de ph para planta de tratamiento de aguas

- residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 14, 1–6.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101409>
- Anand, Aljo. Urawadee, Rajchakit. Vijayalekshmi, S. (2020). Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants. In *Micro and Nano Technologies*. <https://doi.org/B978-0-12-818489-9.00004-9>
- Anand, A., Rajchakit, U., & Sarojini, V. (2020). Detection and removal of biological contaminants in water. In *Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818489-9.00004-9>
- Angulo García, L. D., & Molina Suarez, J. D. (2020). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de curtiembre con carbón activado modificado con nanopartículas magnetizadas* [Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24836>
- Arboleda T., A. F., & M., A. A. C. (2020). *Implementación de la matriz de toma de decisiones (método pugh) para la adquisición de maquinaria, con el fin de reducir costos y optimizar recursos en empresas de construcción de pavimentos* [Universidad Católica de Colombia]. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25612/1/Trabajo de grado Final.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25612/1/Trabajo%20de%20grado%20Final.pdf)
- Babu, B. R., Parande, A. K., Raghu, S., & Kumar, T. P. (2007). *An Overview Wastes Produced During Cotton Textile Processing and Effluent Treatment Methods*. May.
- Baby, Rabia; Saifullah, B. H. Z. (2019). Carbon Nanomaterials for the Treatment of Heavy Metal-Contaminated Water and Environmental Remediation. *Nanoscale Research Letters*, 14(341), 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s11671-019-3167-8>
- Bodzek, M., Konieczny, K., & Kwiecińska-Mydlak, A. (2020). Nanotechnology in water and wastewater treatment. Graphene—the nanomaterial for next generation of semipermeable membranes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(15), 1515–1579. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1664258>
- Cadena M., D. L., & A., C. E. W. (2022). Propuesta para la obtención de biohidrógeno por fermentación oscura a partir de un residuo agroindustrial [Fundación Universidad de América]. In *Repositorio Institucional Lumieres*. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8834>
- Calcina Mamani, R., & Moreno Cusi, Y. (2020). Una mirada a la nanotecnología y su aplicación ambiental en el tratamiento de aguas para consumo humano. *Ingeniería, Facultad D E Electronica, Electrica Y Ciclo, VI*, 1–94. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/3452>

- Chacón, C., Andrade, C., Cárdenas, C., Araujo, I., & Morales, E. (2004). Uso de *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. Aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela. *Boletín Del Centro de Investigaciones Biológicas*, 38(2), 94–108. http://bdigital.ula.ve/storage/pdf/bolcib/v38n2/art_03.pdf
- Chaturvedi, V. K., Kushwaha, A., Maurya, S., Tabassum, N., Chaurasia, H., & Singh, M. P. (2020). Wastewater Treatment Through Nanotechnology: Role and Prospects. *Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards a Sustainable Environment*, 227–247. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7665-8_14
- Chávez-Lizárraga, G. A. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 52–61. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2018.090100052>
- Cheriyamundath, S., & Vavilala, S. L. (2020). Nanotechnology-based wastewater treatment. *Water and Environment Journal*. <https://doi.org/10.1111/wej.12610>
- Choksumlitpol, P., Mangkornkarn, C., Sumtong, P., Onlaor, K., & Eiad-Ua, A. (2017). Fabrication of Anodic Titanium Oxide (ATO) for waste water treatment application. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 6124–6128. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.104>
- Crombet-Grillet, S., Pérez-Pompa, N., Ábalos-Rodríguez, A., & Rodríguez-Pérez, S. (2013). Caracterización de las aguas residuales de la comunidad “Antonio Maceo” de la Universidad de Oriente. *Wastewater Characterization of the Community “Antonio Maceo” of the Oriente University.*, 25(2), 134–142. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=93387792&lang=es&site=ehost-live>
- Davarazar, M., Kamali, M., & Lopes, I. (2021). Engineered nanomaterials for (waste)water treatment - A scientometric assessment and sustainability aspects. *NanoImpact*, 22(October 2020), 100316. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100316>
- Deshpande, B. D., Agrawal, P. S., Yenkie, M. K. N., & Dhoble, S. J. (2020). Prospective of nanotechnology in degradation of waste water: A new challenges. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 22, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100442>
- Devi, K. P., & Chaturvedi, H. (2021). An overview of nanotechnology in water treatment applications and combating climate change. In *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*. INC. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820200-5.00004-X>

- Echeverri, E., Urquijo, S., Suárez, J., Hincapié, A., Quintero, O. E., Duque, A. C., Velásquez Giraldo, A. M., Díez Restrepo, A. E., & Henao Tamayo, L. (2016). OBSERVATORIO CT + i. *Consejo Nacional De Política Económica Y Social*, 53(1), 1–63.
- Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., & Ramírez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO₂. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 517–525. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382014000200016
- Ghosh, P., & Gangopadhyay, R. (2000). Photofunctionalization of cellulose and lignocellulose fibres using photoactive organic acids. *European Polymer Journal*, 36(3), 625–634. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(99\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00093-2)
- Gilpavas, E. (2020). Procesos Avanzados de Oxidación para la degradación de índigo y materia orgánica de aguas Residuales de una Industria textil [Universidad Nacional de Colombia]. In *Departamento de Ingeniería Química*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78505>
- Gilpavas, E., Medina, J., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez, M. (2016). Degradación de Colorante Amarillo 12 de Aguas Residuales Industriales utilizando Hierro Cero Valente, Peróxido de Hidrógeno y Radiación Ultravioleta. *Informacion Tecnológica*, 27(3), 23–34. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000300004>
- Gurushantha, K., Renuka, L., Anantharaju, K. S., Vidya, Y. S., Nagaswarupa, H. P., Prashantha, S. C., & Nagabhushana, H. (2017). Photocatalytic and Photoluminescence studies of ZrO₂/ZnO nanocomposite for LED and Waste water treatment applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(11), 11747–11755. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.091>
- Holland, L., & Zhong, W. (2018). Analytical developments in advancing safety in nanotechnology. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(24), 6037–6039. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1298-x>
- Ibrahim, R. K., Hayyan, M., AlSaadi, M. A., Hayyan, A., & Ibrahim, S. (2016). Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14), 13754–13788. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6457-z>
- Kabbashi, N. A., Nour, A. H., Al-Khatib, M., & Maleque, M. A. (2020). Removal of Chromium With CNT Coated Activated Carbon for Waste Water Treatment. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.10785-4>

- Kamali, M., Persson, K. M., Costa, M. E., & Capela, I. (2019). Sustainability criteria for assessing nanotechnology applicability in industrial wastewater treatment: Current status and future outlook. *Environment International*, *125*(October 2018), 261–276. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.055>
- Khan, N. A., Khan, S. U., Ahmed, S., Farooqi, I. H., Dhingra, A., Hussain, A., & Changani, F. (2019). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment: A review. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, *16*(4), 81–86. <https://doi.org/10.3233/AJW190051>
- Khataee, A. R., Zarei, M., & Pourhassan, M. (2010). Bioremediation of malachite green from contaminated water by three microalgae: Neural network modeling. *Clean - Soil, Air, Water*, *38*(1), 96–103. <https://doi.org/10.1002/clen.200900233>
- Llano, B. A., Cardona, J. F., Ocampo, D., & Ríos, L. A. (2014). Tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio de arcillas y alternativas de uso de los lodos generados en el proceso. *Informacion Tecnologica*, *25*(3), 73–82. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300010>
- Madhav, S., Ahamad, A., Singh, P., & Mishra, P. K. (2018). A review of textile industry: Wet processing, environmental impacts, and effluent treatment methods. *Environmental Quality Management*, *27*(3), 31–41. <https://doi.org/10.1002/tqem.21538>
- Madhu, A., & Chakraborty, J. N. (2017). Developments in application of enzymes for textile processing. *Journal of Cleaner Production*, *145*, 114–133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.013>
- Madhura, L., Singh, S., Kanchi, S., Sabela, M., & Bisetty, K. (2018). Nanotechnology - based water quality management for wastewater treatment. In *Environmental Chemistry Letters*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0778-8>
- Magdalane, C. M., Kaviyarasu, K., Arularasu, M. V., Kanimozhi, K., & Ramalingam, G. (2019). Structural and morphological properties of Co₃O₄ nanostructures: Investigation of low temperature oxidation for photocatalytic application for waste water treatment. *Surfaces and Interfaces*, *17*(August), 100369. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100369>
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2011). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*,

28(1), 39–48.

- Mateus Malagón, A. L., & Torres Castro, J. A. (2019). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de bocardillos para la reutilización en riego agrícola implementando nanoarcillas modificadas magnéticamente como tratamiento terciario. [Universidad Católica de Colombia]. In *ACA. Pregrado Civil* (Issue 1). <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24881>
- Mathur, N., Bhatnagar, P., & Sharma, P. (2012). Review of the mutagenicity of textile dye products. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2(2), 1–18.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Vertimientos y Reúso de Aguas Residuales - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Retrieved July 7, 2022, from <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales/>
- Mukherjee, M., Ghorai, U. K., Samanta, M., Santra, A., Das, G. P., & Chattopadhyay, K. K. (2017). Graphene wrapped Copper Phthalocyanine nanotube: Enhanced photocatalytic activity for industrial waste water treatment. *Applied Surface Science*, 418, 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.222>
- Navas, H. V. G., & Braga, D. F. N. (2011). Selection of a Stirrer Drive Configuration Using Pugh Decision Matrix Methodology. *Científica*, 15(3), 139–143.
- Núñez F., M. (2019). Eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Cajabamba - Cajamarca. Alternativas para mejorar su tratamiento [Universidad Nacional de Cajamarca]. In *Efecto de los agregados de concreto reciclado en la resistencia de la compresión sobre el concreto*. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3526>
- Ortiz, D. L. L. (2009). Contaminación del agua por nitratos: significación sanitaria. *Revista Archivo Medico*, 13(2), 32.
- Ortiz, N. E., & Carmona, J. C. (2015). Aprovechamiento De Cromo Eliminado En Aguas Residuales De Curtiembres (San Benito, Bogotá), Mediante Tratamiento Con Sulfato De Sodio. *Luna Azul*, 40, 117–126. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.9>
- Osorio, rivera M. A., Carrillo barahona, W. E., Looer lalvay, X. A., & Riera guachichullca, E. J. (2021). A qualidade das águas residuais domésticas. *Polo Del Conocimiento, Revista Científico - Profesional*, 6(3), 228–245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Pandey, J., Khare, R., Kamboj, M., Khare, S., & Singh, R. (2011). Potential of Nanotechnology

- For The Treatment of Waste Water. *Asian Journal of Biochemical and Pharmaceutical Research*, 1(2). <https://www-virtualpro-co.ezproxy.uamerica.edu.co/download/potencial-de-la-nanotecnologia-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales.pdf>
- Pang, Y. L., & Abdullah, A. Z. (2013). Current status of textile industry wastewater management and research progress in malaysia: A review. *Clean - Soil, Air, Water*, 41(8), 751–764. <https://doi.org/10.1002/clen.201000318>
- Paulkumar, K., Jesi Reeta, T., Emmanuel Joshua Jebasingh, S., Mangalanagasundari, S., Muthu, K., & Murugan, K. (2021). Potential utilization of zinc nanoparticles for wastewater treatment. In *Aquananotechnology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821141-0.00026-4>
- Qingping Wu, Xiaodong Xu, Haoyao Yang, L. K. (2017). Application of nanotechnology in wastewater treatment. *Nanoscience and Nanotechnology*, 19–25. <http://ojs.whioce.com/index.php/nn/article/viewFile/495/387>
- Quintero, L., & Cardona, S. (2011). Evaluation of the biological treatment for removal of color indigo textile industrial waste water by a microbial consortium in fluidized bed. *Gestión Ambiental*, 14(2), 105–113.
- Rafique, M., Tahir, M. B., & Sadaf, I. (2019). *Nanotechnology: An Innovative Way for Wastewater Treatment and Purification*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02381-2_5
- Romero-Ortiz, L., Ramírez-Vives, F., Álvarez-Silva, C., & Mirana-Arce, M. G. (2011). Uso de hidrófitas y un sistema anaerobio para el tratamiento de agua residual de rastro Lauraceli Romero-Ortiz, Florina Ramírez-Vives 1 , Carlos Álvarez-Silva 2 y María Guadalupe Miranda-Arce 2. *Polibotánica*, 31, 157–167.
- Sadegh, H., Ali, G. A. M., Gupta, V. K., Makhlouf, A. S. H., Shahryari-ghoshekandi, R., Nadagouda, M. N., Sillanpää, M., & Megiel, E. (2017). The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40097-017-0219-4>
- Salar-García, M. J., & Ortiz-Martínez, V. M. (2019). *Nanotechnology for Wastewater Treatment and Bioenergy Generation in Microbial Fuel Cells*. 341–362. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02381-2_15
- Salas-Quintero, D., Alberto-Zapata, M., & Guerrero, J. (2007). Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región cafetalera. *Scientia et Technica*, 13(37), 591–

- Salgado-Bernal, I., Durán-Domínguez, C., Cruz-Arias, M., Carballo-Valdés, M. E., & Martínez-Sardiñas, A. (2011). Bacterias rizosféricas con potencialidades fisiológicas para eliminar materia orgánica de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 28(1), 17–26.
- Santiago Talenas, J. C. (2018). *Estudio de la viabilidad del uso de nanoparticulas de dióxido de titanio en el tratamiento de aguas residuales domesticas a nivel laboratorio en la facultad de ingenieria quimica y textil de la universidad nacional de ingenieria*. 1–135. [http://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/931/SANTIAGO TALENAS%2C JAZMIN CAROLINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/931/SANTIAGO%20TALENAS%20JAZMIN%20CAROLINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Saravanan, N., & Sasikumar, K. S. K. (2020). Waste water treatment process using Nano TiO₂. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 10–12. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.143>
- Sarayu, K., & Sandhya, S. (2012). Current technologies for biological treatment of textile wastewater-A review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167(3), 645–661. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9716-6>
- Saxena, S., Raja, A. S. M., & Arputharaj, A. (2017). *Challenges in Sustainable Wet Processing of Textiles*. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2185-5_2
- Shaba, E. Y., Jacob, J. O., Tijani, J. O., & Suleiman, M. A. T. (2021). A critical review of synthesis parameters affecting the properties of zinc oxide nanoparticle and its application in wastewater treatment. In *Applied Water Science* (Vol. 11, Issue 2). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01370-z>
- Singh, I., & Mishra, P. K. (2018). Nano-membrane filtration a novel application of nanotechnology for waste water treatment. *Materials Today: Proceedings*, 29, 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.284>
- Singh, P., Jain, R., Srivastava, N., Borthakur, A., Pal, D. B., Singh, R., Madhav, S., Srivastava, P., Tiwary, D., & Mishra, P. K. (2017). Current and emerging trends in bioremediation of petrochemical waste: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(3), 155–201. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1318616>
- Soni, R., Pal, A. K., Tripathi, P., Lal, J. A., Kesari, K., & Tripathi, V. (2020). An overview of nanoscale materials on the removal of wastewater contaminants. *Applied Water Science*, 10(8), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01275-3>

- Sridevi, M., Nirmala, C., Jawahar, N., Arthi, G., Vallinayagam, S., & Sharma, V. K. (2021). Role of nanomaterial's as adsorbent for heterogeneous reaction in waste water treatment. *Journal of Molecular Structure*, 1241, 130596. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130596>
- Tahir, M. B., Sohaib, M., Sagir, M., & Rafique, M. (2020). Role of Nanotechnology in Photocatalysis. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815732-9.00006-1>
- Torres Jaya, J. C. (2017). *Análisis del piroclasto volcánico como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora y lubricadora de autos "ambato" ubicada en la ciudad de ambato provincia de tungurahua*. [Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/27015>
- Trivedi, R., & Bergi, J. (2021). Application of bionanoparticles in wastewater treatment. In *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821011-6.00010-4>
- Wang, X., Li, F., Hu, X., & Hua, T. (2021). Electrochemical advanced oxidation processes coupled with membrane filtration for degrading antibiotic residues: A review on its potential applications, advances, and challenges. *Science of the Total Environment*, 784, 146912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146912>
- Wong, J. K. H., Tan, H. K., Lau, S. Y., Yap, P. S., & Danquah, M. K. (2019). Potential and challenges of enzyme incorporated nanotechnology in dye wastewater treatment: A review. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 7, Issue 4, p. 103261). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103261>
- Zekić, E., Vuković, Ž., Halkijević, I., Zelić, E., Hidrokon doo, M., & Ivan Halkijević, A. (2018). Application of nanotechnology in wastewater treatment Authors: Subject review. *Nano-Adsorbens*, 4, 315–323. <https://doi.org/10.14256/JCE.2165.2017>

ANEXOS

**ANEXO 1.
MATRIZ PUGH**

		VARIABLES CRITICAS									
		Eficiencia de remoción de contaminantes	Costos de implementación	Costos de mantenimiento	Viabilidad	Aplicabilidad	Control y análisis de los procesos	Información disponible	Aspectos ambientales de la localización	Tratamiento y manejo de subproductos	Confiabilidad asociada a la técnica
Criterios	Cumplimiento de Requisitos	1	-1	1	1	1	1	0	1	0	0
	Nivel de criticidad	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0
	Facilidad de control	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
	Facilidad de medición del impacto generado en el proceso	1	0	0	1	1	1	-1	0	1	0
		3	0	3	3	3	3	0	3	1	0