



**Propuesta de alternativas no convencionales para el postratamiento de aguas contaminadas
con tintes provenientes de la empresa Textiles Guarne S.A.S. – GUARNETEX**

Juliana Martínez Montoya

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Asesora

Maria Lizeth Marín Marín, Profesional en Administración en Salud: énfasis en Gestión Sanitaria
y Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia
2023

Cita

(Martínez Montoya, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Martínez Montoya, J. (2023). Propuesta de alternativas no convencionales para el postratamiento de aguas contaminadas con tintes provenientes de la empresa Textiles Guarne S.A.S. – GUARNETEX. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia (2023).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
1.Introducción	9
2.Objetivos	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos	11
3.Marco teórico	12
4.Metodología	23
5.Análisis y Resultados	25
6.Conclusiones	30
Referencias	32

Lista de tablas

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos del agua	13
Tabla 2 Parámetros fisicoquímicos del agua residual industrial de la empresa Guarnetex Mayo 2022	14
Tabla 3 Parámetros fisicoquímicos del agua residual industrial de la empresa Guarnetex Noviembre 2022	17
Tabla 4 Clasificación de los procesos avanzados de oxidación	18
Tabla 5 Ventajas y desventajas de los POA	21
Tabla 6 Costos y especificaciones de los diferentes tipos de tratamientos.	26
Tabla 7. POA´s combinados con Coagulación – Floculación . Fuente: Elaboración propia	27

Lista de figuras

Figura 1 Metodología de investigación	24
Figura 2 Diagrama de tortas sobre los artículos encontrados y utilizados	25

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ARnD	Aguas residuales no domésticas
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EF	Electro-fenton
POA	Proceso de Oxidación Avanzada
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales

Resumen

Textiles Guarne S.A.S. Se dedica a la tejeduría y teñido de elásticos exclusivos para la ropa interior. La empresa emplea como tratamiento de aguas residuales no domésticas el método de coagulación-floculación para tratar el agua proveniente de los baños químicos que se le hacen a los elásticos para fijar el color, este es un procedimiento acertado para el tipo de agua residual que se genera, aunque no es suficiente debido a que en colores como turquesa o rojos, el color no es posible removerlo totalmente, y el agua queda coloreada, por lo que este trabajo busca proponer alternativas eficientes y económicas como postratamiento de aguas contaminadas con tintes provenientes de la empresa Textiles Guarne S.A.S. con el propósito de que el agua tratada tenga unos valores aceptables de acuerdo con la norma vigente. Para esto se realizó una revisión de la literatura con el fin de indagar sobre alternativas de postratamiento para este tipo de aguas y poder proponer un postratamiento técnicamente factible y económicamente viable para la empresa. Los documentos que se incluyeron en la elaboración de este informe contenían información o definiciones sobre los tratamientos o procesos buscados. También se tuvo en cuenta que estuvieran aplicados a industrias textiles o que estuvieran combinados con el proceso de Coagulación – Floculación, además de las palabras clave relacionadas con la investigación. En la revisión se pudo observar que diferentes autores compararon los tipos de tratamiento y en su gran mayoría concluyeron que el proceso Fenton era el más adecuado como el postratamiento del tratamiento Coagulación – Floculación debido a su efectividad y bajo costo en la combinación de estos dos procesos, que, aunque hay otros procesos con una mayor remoción del DQO, con el porcentaje que se obtiene en el proceso combinado con Fenton, se lograría cumplir y estar dentro del rango límite máximo permisible de la norma para este parámetro (DQO).

Palabras clave: Efluentes, Industria Textil, Proceso Avanzado Oxidación, Proceso Fenton, Filtros Biológicos, Textil, Aguas Residuales

Abstract

Textiles Guarne S.A.S. It is dedicated to weaving and dyeing exclusive elastics for underwear. The company uses the coagulation-flocculation method as a treatment for non-domestic wastewater to treat the water from the chemical baths that are applied to the elastics to fix the color, this is a successful procedure for the type of wastewater that is generated, although it is not enough because in colors such as turquoise or red the color cannot be completely removed, and the water remains colored, so this work seeks to propose efficient and economical alternatives such as post-treatment of water contaminated with dyes from the company Textiles Guarne S.A.S. with the purpose that the treated water has acceptable values in accordance with the current standard. The documents that were included in the preparation of this report contained information or definitions about the treatments or processes sought. It was also taken into account that they were applied to textile industries or that they were combined with the Coagulation - Flocculation process, in addition to the keywords related to the investigation. As results, different authors compared the types of treatment presented in this report and the vast majority concluded that the Fenton process was the most appropriate as the post-treatment of the Coagulation - Flocculation treatment due to its effectiveness and low cost in combining these two processes, although there are other processes with a greater removal of DQO, with the percentage obtained in the combined Fenton process, it would be possible to comply and be within the maximum permissible limit range of the standard for this parameter (DQO).

Keywords: Effluents, Textile Industry, Advanced Oxidation Process, Fenton Process, Biological Filters, Textile, Wastewater

1. Introducción

Se sabe que hace unas décadas la industria textil se le ha asociado con un alto uso de los recursos naturales disponibles, casi el 59% del agua utilizada en los países desarrollados es para fines industriales (López López, 2016). De hecho, el impacto de los efluentes textiles en el medio acuático ha sido tradicionalmente motivo de gran preocupación porque contienen altas concentraciones de sales, sólidos suspendidos totales, color, Demanda Química de Oxígeno (DQO), nutrientes y compuestos tóxicos como tensoactivos, metales pesados y clorados, compuestos orgánicos (Blanco et al., 2014).

Guarnetex pertenece a la industria textil y se configura como una empresa productora y comercializadora de tejidos angostos, elásticos y rígidos de alta calidad. Los procesos productivos involucrados en las actividades que realiza Guarnetex dan como resultado aguas residuales no domésticas con alta carga contaminante, por lo que se requieren sistemas de tratamiento eficientes con el fin de dar cumplimiento a los parámetros establecidos en la Resolución 0631 del 2015, Art 13 para la actividad de “Fabricación de Textiles” con vertimiento de agua al alcantarillado público según Art. 16 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).

El agua empleada en los procesos textiles varía en forma considerable, dependiendo del proceso específico y del equipamiento utilizado por la planta, por ejemplo, en el teñido con colorantes dispersos, se utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto (Lizama, 2008). En la tinción con colorantes reactivos, las cifras varían entre 125 y 170 litros por kilogramo de producto (Lizama, 2008).

La descarga de estos efluentes en los cuerpos de agua conduce a una grave contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en las cercanías de las industrias textiles. Los colorantes no son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos vivos, causando diversas enfermedades y trastornos (perturbación en la vida acuática) (Zaruma et al., 2018).

Estudios conducidos por varios investigadores revelan que al menos entre 800 y 1000 mg/L de compuestos orgánicos no se adhieren a los productos textiles y quedan disueltos o suspendidos en el agua (Torres Andrade, 2014). Por tanto, es necesario aplicar tratamientos a esta agua residual a fin de conseguir que las aguas puedan ser descargadas a sistemas de alcantarillado o cuerpos

receptores naturales, con parámetros de calidad aceptables que exige Empresas Públicas de Medellín y el AMVA o con amplias posibilidades de reúso en la propia industria. (Art.16, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015)

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Proponer alternativas eficientes y económicas para el postratamiento de aguas contaminadas con tintes provenientes de la empresa Textiles Guarne S.A.S.

2.2 Objetivos específicos

- Indagar sobre métodos no tradicionales de purificación de las aguas residuales industriales que puedan ser aplicados a la empresa Textiles Guarne S.A.S.
- Comparar resultados y exponer sobre cuál sería la alternativa más apropiada para tratar el agua residual de la empresa Textiles Guarne S.A.S.

3. Marco teórico

3.1.La industria textil

El impacto de las industrias sobre el medio ambiente y los recursos naturales ha cobrado importancia, no sólo por el crecimiento de la producción, sino también porque este crecimiento se ubica en sectores que tienen un gran impacto sobre el medio ambiente.

Este impacto ambiental negativo que causa la industria textil es colosal. Debido a la presencia de componentes tóxicos y no biodegradables en las aguas residuales textiles, como las complejas estructuras aromáticas y poliméricas, así como su alta solubilidad en agua, se ha convertido en una seria amenaza para la biota acuática. Por este motivo, debe evitarse la entrada de dichos compuestos orgánicos en cuerpos de agua sin tratamiento previo o con un tratamiento incompleto o inadecuado (GilPavas, 2020)

La industria de la moda es la más contaminante del mundo, por encima de la manufacturera, la de energía, la de transporte e incluso la alimentaria. (Carranza, 2019)

Este tipo de industria genera agua residual que contiene cargas contaminantes. En este caso, las aguas residuales de una empresa dedicada a la fabricación de elásticos exclusivos para ropa interior pueden contener los siguientes contaminantes (Zhang et al., 2021):

- Concentraciones de compuestos orgánicos o inorgánicos no biodegradables (metales, tintes, pesticidas, fosfatos y surfactantes).
- Altas concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Alta Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).
- Alta Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Altos niveles de Sólidos Disueltos Totales (TDS).

Se considera que los tintes se encuentran entre los contaminantes más dañinos ya que la presencia de azufre, naftol, colorantes de tina, nitratos, ácido acético, jabones, enzimas, compuestos de cromo y metales pesados como cobre, arsénico, plomo, cadmio, mercurio, níquel y cobalto hacen que, en conjunto, el efluente textil sea altamente tóxico para los organismos acuáticos, además estos tintes son potencialmente peligrosos para la salud humana (López Fernández, 2020)

3.2.Los colorantes

Aislándonos de factores ambientales como longitud de onda de la fuente lumínica, reflexión, dispersión, etc., el tinte de un objeto es función del sistema cromóforo y auxocromo del colorante (Marcano, 2018). Son sustancias que se utilizan para teñir tejidos, estos penetran en la tela y la cambian químicamente, lo que da como resultado un color que se mantiene de forma permanente a través del uso repetido (Adaptado de Yorkshire España). Hoy en día, se han producido alrededor de 10.000 colorantes, de los cuales, el 30% son del tipo azo, este grupo de colorantes son el de mayor uso dentro de la industria textil, que se calcula aproximadamente al 70% de la producción total (Zaruma et al., 2018). La utilidad de un colorante para un uso particular depende de: tamaño molecular, grupos solubilizantes, grupos aceptores de protones, longitud de la cadena, grupos alquilo, etc. (Juárez Avalos, 2015)

Por otro lado, en la Tabla 1 se presentan los parámetros que permiten evaluar la calidad del agua, se deben tomar en cuenta los elementos que están contemplados en la normativa ambiental vigente y cuyo análisis permitirá evidenciar la eficacia del tratamiento aplicado al efluente residual industrial.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos del agua. Elaboración propia

Parámetros físicos	Parámetros químicos
Color aparente	pH
Color verdadero	Demanda Química de Oxígeno
Turbidez	Demanda Biológica de Oxígeno
Sólidos Suspendidos Totales	Carbono Orgánico Total

Conductividad eléctrica

Aceites y grasas

Temperatura

Caracterizar las aguas residuales de una industria o empresa textil es bastante útil y necesaria ya que esta proporciona una amplia variedad de información sobre el tipo y la concentración de los contaminantes que se tienen, y por esto la empresa realizó dos caracterizaciones al agua que se genera en el proceso de tintorería con el fin de conocer cuan contaminada está el agua aun así después de haber sido tratada, estas fueron realizadas en mayo y noviembre ambas del año 2022. A continuación, en las tablas 2 y 3, se muestran las características fisicoquímicas del ARnD según los datos suministrados de la empresa y los valores a cumplir según el artículo 16 de la Resolución 0631 de 2015: “Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a alcantarillados públicos en las actividades asociadas con la fabricación y manufactura de bienes”, específicamente “Fabricación de Textiles”.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del agua residual industrial de la empresa Guarnetex Mayo 2022. Datos tomados de la empresa Guarnetex

Referencia	Unidades	Valor Máx. Art. 13	Vertimiento ARnD-Guarnetex Mayo 2022	
Temperatura	°C	40.00	< 40.00	Por debajo del valor máximo permisible
pH	Unidades de pH	5.00-9.00	6.6-7.86	Dentro del rango permisible
Demanda Química de Oxígeno	mg O ₂ /L	600.00	3358	Por encima del valor máximo permisible
Demanda Biológica de Oxígeno	mg/L	300.00	1055	Por encima del valor máximo permisible
Sólidos Suspendidos Totales	mg SST/L	75.00	150	Por encima del valor máximo permisible
Grasas y aceites	mg/L	30.00	75-305	Por encima del valor máximo permisible

Cadmio	mg/L	0.02	6.96	Por encima del valor máximo permisible
Cromo	mg/L	0.50	13.51	Por encima del valor máximo permisible
Hidrocarburos	mg/L	10.00	19	Por encima del valor máximo permisible

En la Tabla 2 podemos observar que la caracterización que se le hizo al efluente de la PTARnD cumplía sólo con 2 de los 9 parámetros evaluados, por lo que fue necesario, investigar e implementar una planta de tratamiento acorde al tipo de agua que se manejan en la empresa, ya que se tiene un agua de difícil tratamiento por los procesos de teñido y fijación que se le hacen a los elásticos, tomando como mejor opción el tratamiento de Coagulación-Floculación.

Los tratamientos de aguas residuales textiles convencionales involucran la coagulación química con sales de hierro o aluminio combinada con procesos biológicos o adsorción (Vedrenne et al. 2012). El proceso de Coagulación-Floculación consiste en la rápida dispersión de un coagulante a las aguas residuales seguido de una agitación intensa comúnmente definida como una mezcla rápida, por lo que puede lograr una mayor eliminación de partículas en el efluente y así obtener una mejor clarificación en el agua en comparación con los procesos de tratamientos convencionales (López López, C., 2017). 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 cumplir con los valores permisibles establecidos por 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. Esto implica que los métodos convencionales sean insuficientes y se requiera buscar alternativas eficientes para el tratamiento de este tipo de aguas residuales. (Gil Pavas et al., 2017)

La producción de textiles necesita el uso de un extenso procesamiento químico, por lo tanto, las aguas residuales textiles contienen residuos de detergentes, tintes y agentes auxiliares, lo que

resulta en una alcalinidad, salinidad y un color intenso extremadamente altos. Estas características son especialmente características de los efluentes de tintura, lo que hace que estas aguas residuales sean poco biodegradables, y la relación DBO/DQO por debajo de 0,4 las descalifica para el tratamiento biológico (Bilińska & Gmurek, 2021).

Conociendo la problemática que se tiene con el tipo de aguas residuales de la empresa, se hace necesario recurrir a sistemas avanzados que permiten su postratamiento, de los numerosos procesos que se expusieron anteriormente, se han escogido los POA y el tratamiento previo a este tipo de proceso es el de Coagulación - Floculación ya existente en la empresa.

Sabemos que los procesos convencionales se pueden dividir en:

- Pre- tratamiento: Tiene como función fundamental preparar el agua residual para ser tratadas por las etapas siguientes y así evitar la abrasión y daños de tuberías como también cuidar las bombas, los equipos y demás elementos del proceso. “Entre los principales métodos de pretratamiento podemos encontrar: Trampas de grasa, desarenadores, trituradores, neutralización, homogenización etc.” (Fernández & Quispe, 2021).

- Tratamientos primarios: Se basan en procesos unitarios de separación, en esta no hay o no se produce en las alteraciones de las estructuras químicas de los contaminantes, su misión es la de separar por medios físicos todas las partículas en suspensión que se encuentren en las aguas residuales a tratar. “Entre estos procesos encontramos la sedimentación, flotación, filtración, coagulación – floculación, precipitación química y oxidorreducción. Con estos procesos se logra remover la DBO entre un 25%-50% y los sólidos suspendidos hasta un 80%.” (Lozano Rivas, 2012).

- Tratamientos secundarios: Son utilizados para eliminar toda la materia orgánica que es biodegradable y sólidos. En esta etapa se pretende remover DBO y sólidos suspendidos, “entre los que podemos encontrar los filtros percoladores, lodos activos, lagunas aireadas, biodiscos, etc.” (Fernández & Quispe, 2021).

- Tratamientos terciarios: En esta etapa se eliminan elementos y todas las sustancias que no se lograron eliminar en los tratamientos secundarios, para hacer más eficientes el proceso de descontaminación, donde se producen reacciones químicas entre estos elementos y los compuestos presentes en el agua residual, siendo selectivos para cada compuesto a eliminar. “Los tratamientos

terciarios se dividen en adsorción, intercambio iónico, filtración, lagunas y desinfección” (GilPavas, 2020)

Implementada ya la PTAR con el método de Coagulación-Floculación, se le hace una nueva caracterización al agua (Tabla 3) donde se observa una mejoría considerable en los parámetros evaluados, esta vez la DQO fue el único parámetro que no cumple con la resolución.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del agua residual industrial de la empresa Guarnetex Noviembre 2022, Datos tomados de la empresa Guarnetex

Referencia	Unidades	Valor Máx. Art. 13	Vertimiento ARnD-Guarnetex Mayo 2022	
Temperatura	°C	40.00	32.3	Por debajo del valor máximo permisible
pH	Unidades de pH	5.00-9.00	7.5-8.5	Dentro del rango permisible
Demanda Química de Oxígeno	mg O ₂ /L	600.00	1322	Por encima del valor máximo permisible
Demanda Biológica de Oxígeno	mg/L	300.00	39	Por debajo del valor máximo permisible
Sólidos Suspendidos Totales	mg SST/L	75.00	27	Por debajo del valor máximo permisible
Sólidos sedimentables	mg/L	3.00	0.1	Por debajo del valor máximo permisible
Cromo	mg/L	0.50	<0.50	Por debajo del valor máximo permisible

La creciente demanda de la sociedad para la depuración de aguas contaminadas de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado, en la última década, al desarrollo de nuevas tecnologías de purificación (Varela Reyes, 2013). Por lo que se hace necesario explorar tecnologías no convencionales de tratamiento de aguas residuales industriales que puedan ser compatibles con el tratamiento existente en la empresa, entre ellas se encuentra la

filtración de membranas, tratamientos biológicos, tratamiento por evaporación y tratamientos fisicoquímicos.

Procesos de Oxidación Avanzada (POA): Se han convertido en una tecnología alternativa para la eliminación de contaminantes cuando estos son difíciles de eliminar por tratamientos tradicionales (como es el caso de los colorantes de la industria textil) logrando oxidar una gran variedad de contaminantes orgánicos (GilPavas, 2020, Torres Andrade, 2014).

Los POA han sido ampliamente estudiados y se consideran una tecnología prometedora tanto como un tratamiento alternativo a los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, como una mejora de los métodos actuales de tratamiento biológico, especialmente los destinados a los residuos altamente tóxicos y de baja biodegradabilidad (Yonar et al., 2006). Los procesos convencionales de aguas residuales no logran detoxificar muchas de las aguas residuales industriales generadas hoy en día de una forma eficiente y económica (Adaptado de Torres Andrade, 2014). Los POA se caracterizan por la generación de radicales OH. Este radical se genera por medios fotoquímicos o por otras formas de energía capaces de degradar una gran variedad de sustancias tóxicas al convertir compuestos orgánicos en dióxido de carbono, agua y sustancias inorgánicas debido a que poseen un elevado potencial de oxidación (Torres Andrade, 2014).

Han sido ampliamente utilizadas para la degradación de contaminantes y detoxificación de aguas residuales que contienen compuestos recalcitrantes durante los últimos años; éstas se caracterizan por la producción de radicales hidroxilo (OH•) el cual es un poderoso oxidante no selectivo capaz de oxidar y mineralizar casi cualquier molécula orgánica produciendo CO₂ y aniones inorgánicos (HincapiéMejía et al., 2011)

Estos procesos son utilizados para la reducción de parámetros como DQO, COT y toxicidad de aguas residuales tratadas debido a la alta reactividad que manejan (Del Moro et al., 2013). La generación de radicales hidroxilo puede ser acelerada si se usa agentes oxidantes como ozono, peróxido de hidrógeno, radiación UV y catalizadores como dióxido de titanio y en base a esto los POA se clasifican como procesos no fotoquímicos y proceso fotoquímicos (Monge & Silva, 2016). A continuación, se describen algunos de los POA más utilizados en el tratamiento de aguas residuales:

Tabla 4. Clasificación de los procesos avanzados de oxidación (Tomado de: Cuesta Berrio, 2019)

Procesos fotoquímicos	Procesos no fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)	Oxidación en aguas subcrítica y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrogeno (O_3/H_2O_2).	Fotólisis de agua en ultravioleta de vacío (UVV).
Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2)	UV/ H_2O_2
Oxidación electroquímica	UV/ O_3
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones.	Foto-Fenton y relacionados
Plasma no térmico	Fotocatálisis heterogénea
Descarga electrohidráulica y ultrasonidos	Fotocatálisis homogénea

- **Fenton:** La reacción de Fenton es un proceso de oxidación propuesto por H. J. H Fenton, (1894) para la oxidación de ácido tartárico. Este se basa en generar radicales de hidroxilo ($\bullet OH$) por la adición de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a sales metálicas de hierro (Fe^{+2}) en disolución, obteniendo mejores resultados a valores de pH = 3,0 (Salas C, 2010)

Una de las ventajas de este proceso es que no requiere energía externa para descomponer al peróxido de hidrógeno en sus radicales hidroxilo, haciéndolo un método sencillo y efectivo de catálisis homogénea. Una de las desventajas del método se da cuando en disolución se encuentran aniones disueltos tales como fosfatos, cloruros, nitratos, etc., éstos pueden provocar una reacción de complicación con el hierro, disminuyendo la capacidad del Fe^{+2} de disociar el H_2O_2 y termina deteniéndose el ciclo.(Salas C, 2010)

- **Foto Fenton:** El proceso foto-Fenton (H_2O_2 en presencia de Fe^{2+}), fue descrito por primera vez por Henry J. Fenton, quien demostró que el H_2O_2 podía activarse en presencia de los iones Fe^{2+} para oxidar ácido tartárico (Fenton, H. J. H ,1894). En este proceso el reactivo de Fe(II) se oxida a Fe(III) descomponiendo el peróxido de hidrógeno para formar radicales hidroxilo, el empleo de la radiación UV-Vis incrementa el poder de oxidación principalmente por la foto-reducción de Fe(III) a Fe(II) la cual produce más radicales hidroxilo y de esta forma se establece un ciclo en el reactivo de Fenton y se producen los radicales hidroxilo para la oxidación de compuestos orgánicos;

adicionalmente es posible usar la radiación solar, lo que eliminaría el costo de la radiación UV, por lo que se considera una versión mejorada del proceso Fenton.. (HincapiéMejía et al., 2011). Por ello, el proceso foto-Fenton ha demostrado ser una buena alternativa para tratar gran variedad de contaminantes de una manera más eficiente, de manera que se mejora la biodegradabilidad del efluente (Vedrenne et al., 2012); especialmente para aguas residuales textiles que contienen altos niveles de colorantes, sólidos en suspensión y es usualmente utilizada cuando se requiere una alta reducción de demanda química de oxígeno. (HincapiéMejía et al., 2011)

- **Fotocatálisis heterogénea:** Se basa en la generación de radicales hidroxilo por medio de las reacciones de oxido-reducción que suceden en la superficie de un fotocatalizador debido a la acción de la luz UV y la presencia de un agente oxidante como lo es el oxígeno presente en el aire o el peróxido de hidrógeno (HincapiéMejía et al., 2011). De otra forma, este proceso se basa en la foto excitación de un semiconductor sólido como resultado de la absorción de radiación electromagnética, en general en la zona del ultravioleta próximo. La radiación provoca la excitación de electrones en la banda de valencia del sólido, lo que origina la formación de huecos caracterizados por un potencial de oxidación muy elevado. (Zapata Pérez, 2016)

Este término se aplica a la aceleración de una fotorreacción por la acción de un catalizador, el uso de TiO_2 en estos procesos son de gran interés debido a su alta actividad foto catalítica, falta de toxicidad, estabilidad biológica y foto química en soluciones acuosas y su naturaleza químicamente inerte, además el propio catalizador es de muy bajo costo y de fácil disponibilidad (López López, 2016).

- **Electro-fenton:** En este proceso se utiliza electricidad como fuente de energía limpia, por lo que el proceso general no crea contaminantes secundarios, dado que el proceso E-Fenton no utiliza reactivos nocivos, es un método respetuoso con el medio ambiente para el tratamiento de agua y aguas residuales (Nidheesh & Gandhimathi, 2012).

Este proceso no requiere adición de otro químico que no sea la cantidad catalítica de Fe^{+2} , ya que el H_2O_2 se produce in situ, evitando así el transporte de este oxidante peligroso. En el proceso con descarga eléctrica, la adición de oxidantes tales como H_2O_2 produce radicales libres altamente

reactivos mediante la foto disociación de H_2O_2 y por lo tanto mejora el proceso global (Jácome et al., 2015).

- **Ozonización con H_2O_2 :** Entre las posibles mezclas de agentes oxidantes, la combinación peróxido de hidrógeno y ozono es sin duda una de las más utilizadas. El proceso pretende combinar la oxidación directa (y selectiva) del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales $HO\bullet$ con los compuestos orgánicos. El uso de dos o más oxidantes combinados permite aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica. La ozonización se realiza en medio alcalino para aumentar la velocidad de descomposición del ozono, incrementando así la velocidad de generación de radicales $HO\bullet$ (Monge et al., 2018).
- **Ozono/UV:** En particular, la combinación O_3/UV es de especial interés por los diferentes procesos de degradación que coexisten: fotólisis directa, ozonización directa y oxidación por radicales $HO\bullet$ que generan reacciones rápidas y no selectivas. El ozono ve potenciada su actividad en muchos casos por la aplicación de radiación UV, generalmente a 254 nm. Esto se debe a que la molécula se descompone a través de una secuencia de reacciones que le llevan a formar el radical $HO\bullet$ (Monge et al., 2018).

Unas ventajas que se han observado de la aplicación de los procesos avanzados de oxidación son entre otras, las siguientes:

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los POA. Adaptado de: Cuesta Berrio, 2019 - Torres Andrade, 2014

Ventajas	Desventajas
Interviene en el tratamiento de contaminantes empleando reactivos a baja concentración.	El alto costo y algunas veces son difíciles de operar.
El proceso impide la formación de subproductos o se forman en baja concentración.	Las técnicas avanzadas de oxidación como las aplicadas se desarrollan en sistemas de tratamiento por lotes, esto es en instalaciones industriales pequeñas o medianas.
El contaminante no solo cambia de fase, sino que a su vez es transformado químicamente.	Se debe elegir muy bien el proceso de acuerdo con las características del agua.

El proceso resulta útil en la remoción de contaminantes refractarios tolerantes a procesos biológicos.

Es empleado para disminuir la concentración de compuestos formados en pretratamientos alternativos.

El tiempo de reacción es relativamente corto en comparación con otros métodos de tratamiento, como el tradicional uso de sulfato de aluminio. o Se elimina casi totalmente el color de efluentes cuya matriz es fuertemente coloreada.

La aplicación de radiación ultravioleta mejora la velocidad de reacción y el tiempo de contacto.

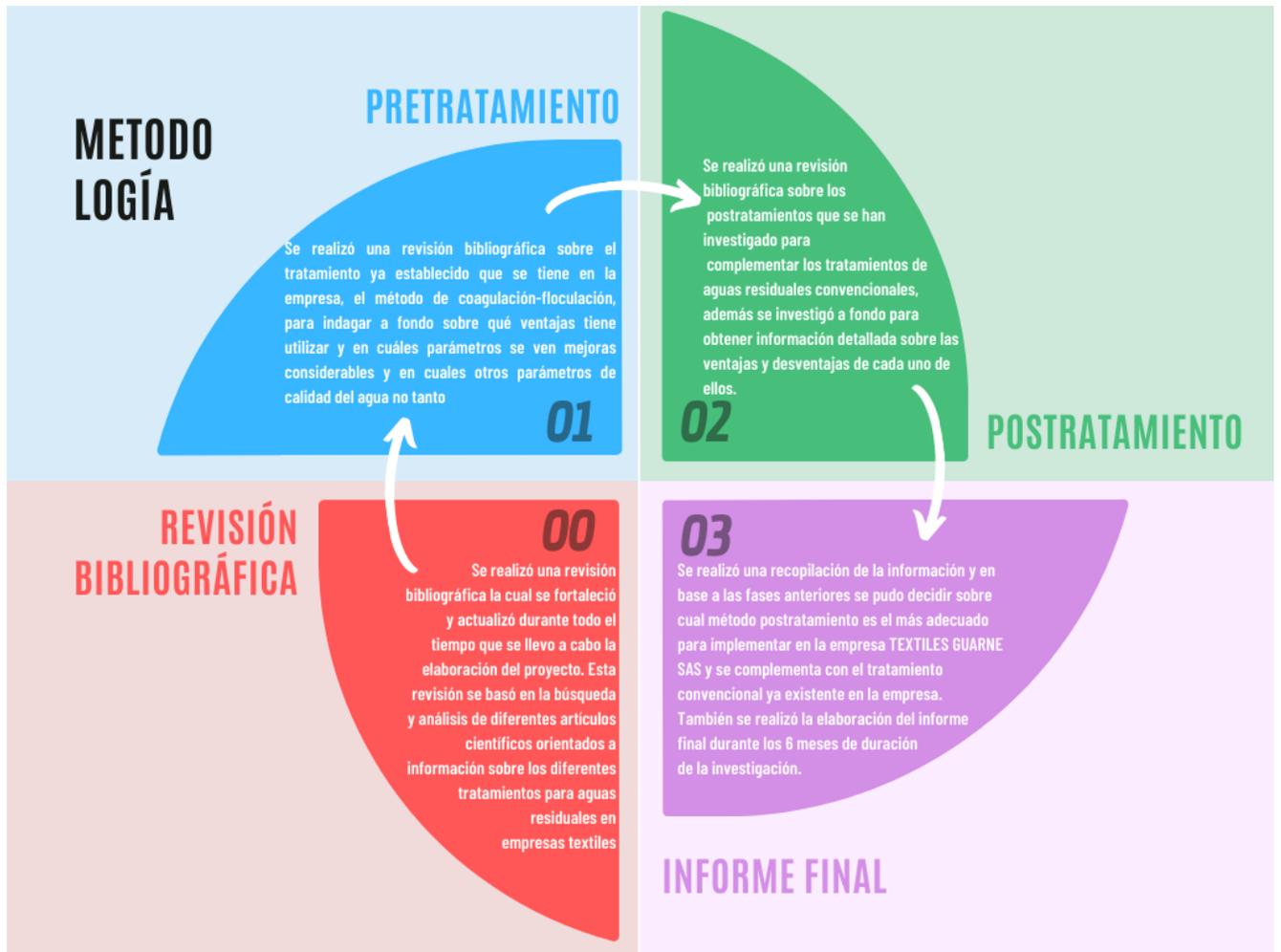
El olor del efluente se reduce significativamente en tiempos cortos luego de la aplicación de los químicos y la radiación UV, esto se debe a la fuerte oxidación de la materia orgánica presente en el efluente a ser tratado.

4. Metodología

Para la implementación de la metodología se tuvieron en cuenta cuatro fases distribuidas en un periodo de 6 meses, las cuales pueden observarse en la Figura 1. Inicialmente se realizó una búsqueda de la literatura de los diferentes tipos de tratamientos que pueden complementar al tratamiento existente en la empresa. Esta búsqueda consistió en una revisión bibliográfica en repositorios académicos en diversas bases de datos, como Scielo, ScienceDirect y Scopus. Para la selección de los artículos científicos se aplicaron diversos filtros a la búsqueda, como el año de publicación, el idioma (Inglés), no contar con duplicidad, investigaciones específicamente acerca de tratamiento de aguas residuales industriales, además, se buscaron palabras claves como: procesos de oxidación avanzada, procesos de oxidación avanzada AND tratamientos de aguas residuales textiles, procesos de oxidación avanzada AND tratamientos de coagulación-floculación, postratamiento para aguas residuales de la industria textil, entre otros. Se incluyeron también aquellos documentos que consistieron en POA que ayudaron a reducir la DQO, parámetro que no cumplió el límite permitido en la última caracterización de aguas de la empresa.

Los documentos que se incluyeron en la elaboración de este informe contenían información o definiciones sobre los tratamientos o procesos buscados. También se tuvo en cuenta que estuvieran aplicados a industrias textiles o que estuvieran combinados con el proceso de Coagulación – Floculación.

Figura 1. Metodología de investigación. Fuente: Elaboración propia

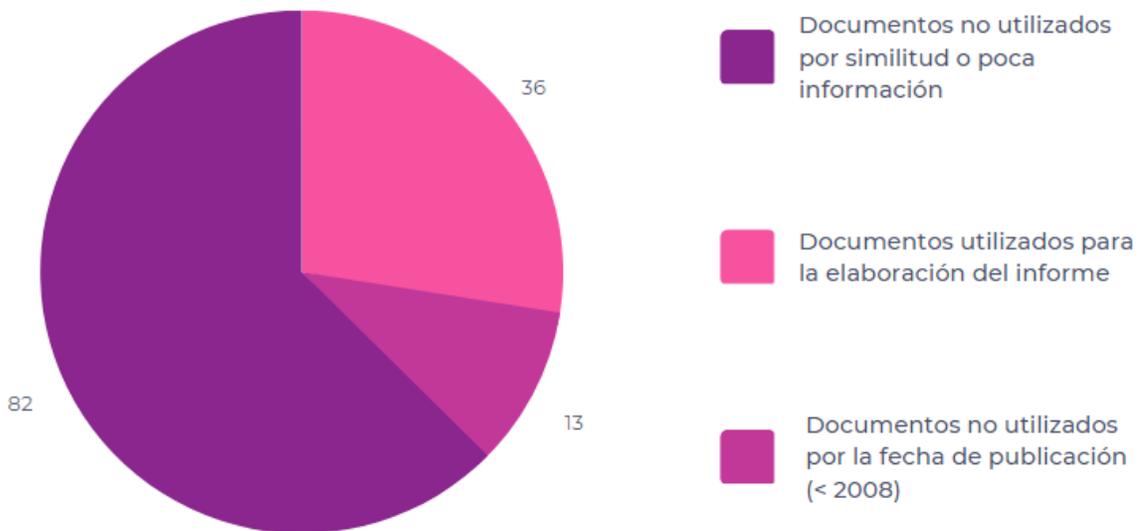


5. Análisis y Resultados

5.1. Resultados de la búsqueda

En la búsqueda de la información para la elaboración de este informe se recuperaron 131 documentos que contenían información importante, por lo que a continuación se relacionan los totales de los documentos incluidos y los documentos que no fueron incluidos.

Figura 2: Diagrama de tortas sobre los artículos encontrados y utilizados. Fuente: Elaboración propia



5.2. Análisis de la búsqueda

La búsqueda de información se enfocó en los tratamientos secundarios, en este caso más específicamente los POA ya que estos procesos tienen por objetivo la eliminación de compuestos solubles no biodegradables y/o con alta estabilidad química, presentes en las aguas residuales (Poyatos et al., 2010). Debido a la alta reactividad de los radicales hidroxilos es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos hasta su total mineralización, logrando así una reducción de la DQO, COT y la toxicidad en las aguas residuales tratadas (Del Moro et al., 2013). Los POA son especialmente útiles también como proceso de postratamiento para mejorar las características de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores, además, “estos son considerados como un tratamiento para el futuro debido a su alta eficiencia en la desinfección

contra la mayoría de los virus y bacterias” (López López, 2017). En la Tabla 6 se presentan algunos de los POA encontrados en la literatura que son adecuados para el postratamiento de las aguas en cuestión, se consignan los resultados más relevantes obtenidos por los autores y el costo aproximado por metro cúbico tratado para cada POA.

Tabla 6. Costos y especificaciones de los diferentes tipos de tratamientos. Fuente: Elaboración propia

Proceso	Resultados relevantes	Costo aproximado por m ³
Fenton	<p>El autor Zapata Loaiza (2022) concluyó que los colorantes naranja de metilo y rojo Congo experimentan el 88% de degradación mediante tratamiento con Fenton en un tiempo de 60 min. Los colorantes azul de metileno y amaranto se degradan totalmente (98%) con el proceso Fenton, el colorante rodamina B sufre degradación total (100%) cuando se utiliza el proceso Fenton. Por lo que, de análisis de los porcentajes especificados, puede concluirse que el proceso Fenton es el que conduce a los mejores resultados globales con respecto al proceso de fotocatalisis heterogénea</p> <p>El autor (Rosales Palomino, 2017) en su investigación logró la remoción de turbidez, color, demanda química de oxígeno, por encima de 96%, donde la dosis optima en este estudio, fue a un pH ácido 2.6, durante 24 horas de reposo del sistema, a una temperatura ambiente, tiempo de mezcla de 60min y a una velocidad de mezclada de 300rpm. El proceso fenton a comparación de otros de tratamiento de oxidación posee una mayor eficiencia en la degradación de colorantes, esto debido al alto poder oxidativo 2.8v del radical hidroxilo. La reducción del contenido de colorantes de un inicial >100 hasta 5 unidades colorimétricas, así mismo la turbidez inicial fue de 118 UNT logrando reducir hasta 4 UNT, de igual manera el DQO inicial oscilaba en 1390mg/ litro logrando reducir a 343mg/l.</p> <p>Núñez & Vergara (2015) concluyeron que el proceso Fenton logra degradar el colorante negro ácido 25 (NA52), sin embargo, se requiere un tiempo de dos horas para obtener concentraciones aproximadas. Los porcentajes de remoción teóricos para Fenton fueron 97.57 %</p>	6.000 COP
Foto- Fenton	Núñez & Vergara (2015) concluyeron que el proceso Foto - Fenton logra degradar el colorante negro ácido 25 (NA52), logra en un tiempo de 30 minutos los porcentajes de remoción, este es del 97.62 %,	10.000 COP
Fotocatalisis heterogénea	Es una alternativa de tratamiento que posee una alta efectividad para la oxidación de materia orgánica, además, este proceso opera a temperatura ambiente y presión atmosférica, ahorrando costos operacionales. A su	30.000 COP

vez, su alta eficiencia permite degradar una gran cantidad de compuestos, incluso aquellos que no son biodegradables. Sin embargo, el uso de lámparas como fuente de irradiación ha sido una de sus limitantes para promover su implementación a mayor escala, ya que incrementan los costos del proceso (Muñoz Flores, 2022)

El autor Zapata Loaiza (2022) concluyó que los colorantes naranja de metilo y rojo Congo experimentan el 95% de degradación mediante tratamiento con fotocátalisis heterogénea en un tiempo de 60 min. Los colorantes azul de metileno y amaranto se degradan totalmente (100%) con fotocátalisis heterogénea, el colorante rodamina B sufre degradación total (99%) cuando se utiliza el proceso fotocátalisis heterogénea.

Electro Fenton	Reducción de COT [180 min]: 30%; Decoloración [30 min]: 75– 85% para una concentración de 60-100 mg/L; Baja eficiencia debido al barrido radical del cátodo de grafito. Reducción de toxicidad [90 min]: vertido seguro (Monge et al., 2018).
Ozonización con H ₂ O ₂	99% DQO (inicialmente 930 mg/L) y 96% de reducción del color en 90 min [pH = 3; H ₂ O ₂ = 200 mg/L; O ₃ = 2 g/h; lámpara de 15 W, 254 nm]. Y, sobre un 90% de eliminación solo con UV/O ₃ con menor coste por no requerirse ajuste del pH ni H ₂ O ₂ (Monge et al., 2018).

También se hizo una comparación de los POA con el proceso de Coagulación – Floculación que podemos observar en la Tabla 7

Tabla 7. POA´s combinados con Coagulación – Floculación . Fuente: Elaboración propia

Proceso	Observaciones por autores
Coagulación – Floculación + Fenton	<p>Amor et al. (2015) en su investigación encontró esta combinación condujo a altas tasas de eliminación de DQO, pero extendió el tiempo de tratamiento en el rango de varios días.</p> <p>Se observó que después de 60 minutos de reacción, la eficiencia del proceso es constante. La DQO se redujo en un 75%, el COT se redujo en un 62%, mientras que la demanda bioquímica de oxígeno se redujo en un 25.5%, lo que implica que el proceso Fenton es eficiente para eliminar un alto contenido de materia orgánica. La eliminación de la turbidez y sólidos totales fue del 97% y 86% respectivamente. La relación DBO₅/DQO de aguas residuales sin procesar es 0.14 y aumentó a 0.41; lo que indica que el agua tratada es biodegradable. (GilPavas, 2020)</p>

La etapa de coagulación/floculación es fundamental para reducir los sólidos suspendidos totales, el contenido orgánico y el color para mejorar la eficiencia del tratamiento posterior, y complementarlo con el proceso Fenton ya que una de sus características más importante es que se realiza a presión y a temperatura ambiente, además la abundancia del hierro no presenta toxicidad en el agua.

Coagulación – Floculación +
Foto Fenton

El color se degradó por completo y la degradación de la DQO se estabilizó alrededor 86%, después de los 60 minutos de reacción. Se encontró, que después del minuto 60 minutos de reacción, la eficiencia del proceso es constante. El COT se reduce en un 76%, mientras que la demanda bioquímica de oxígeno se reduce en un 27%, lo que implica que el proceso Foto Fenton es más eficiente que el proceso Fenton para eliminar un alto contenido de materia orgánica. La eliminación de la turbidez y sólidos totales fue del 100% y 91% respectivamente. La relación DBO₅/DQO de aguas residuales sin procesar es 0.14 y aumentó a 0.72; lo que indica que el agua tratada es biodegradable. (GilPavas, 2020)

Ozonización + Coagulación

Rendimientos: después de ozono [70 min; 56 mg O₃/min; 1.6 L/min; pH=10.3] DQO = 25%, Color = 43%. Después de coagulación con Ca (OH)₂ [787 mg/L, pH = 12] DQO = 50%, COT = 42%, Color = 62%.; eliminación eficaz de compuestos organoclorados después de las dos etapas. (Monge et al., 2018)

En un estudio llevado a cabo por Gil Pavas (2020), el proceso Coagulación-Floculación + Fenton fue ligeramente más lento que el proceso Coagulación – Floculación + Foto Fenton, alcanzándose un 67 y 76% de mineralización, respectivamente, después de 60 min de operación.

También los autores Loaiza & Tandaypan (2022) concluyeron que los procesos de oxidación avanzada con mayor empleabilidad en la industria textil son los procesos fotoquímicos; siendo el Foto Fenton y la Fotocatálisis los más destacados de entre todos; debido a su gran capacidad de degradación y efectos sinérgicos para los colorantes y/o tintes textiles (100%) y su remoción del material orgánico (<90%) en el efluente residual. De la misma manera para los procesos no fotoquímicos, en este caso, el que más predominancia tuvo fue el proceso Fenton.

Por otro lado, los autores Fernández & Quispe (2021) en su trabajo concluyeron que el nivel de eficiencia de remoción de contaminantes en las aguas residuales mediante el proceso Electro-fenton alcanzó en su mayoría altos índices de porcentaje, siendo el más elevado el de 91.5% de eficiencia, mientras que el índice menor fue de 53%. El proceso de tratamiento mediante el método Electro-Fenton ayudó a modificar las características físicas y químicas de aguas residuales, logrando reducir el nivel de turbidez hasta un 79%, la concentración de DBO alcanzando el 87.6% y la concentración de DQO alcanzando el 93% bajo condiciones óptimas.

6. Conclusiones

- La búsqueda de información se enfocó en los tratamientos secundarios, en particular los POA, que tienen como objetivo eliminar los compuestos no biodegradables y/o con alta estabilidad química en las aguas residuales. Estos procesos, como el Fenton y la fotocátalisis heterogénea, son especialmente útiles como proceso de postratamiento para mejorar las características de las aguas antes de su descarga a los cuerpos receptores. El proceso Fenton se ha encontrado que tiene una alta eficiencia en la eliminación de colorantes y otros contaminantes orgánicos e inorgánicos, lo que lo convierte en una de las mejores opciones. Por otro lado, la fotocátalisis heterogénea también es una alternativa efectiva para la oxidación de materia orgánica y es capaz de degradar una gran cantidad de compuestos, incluso aquellos que no son biodegradables. Sin embargo, el uso de lámparas como fuente de irradiación ha sido una de sus limitantes para promover su implementación a mayor escala debido a que incrementan los costos del proceso.
- En conclusión, se puede afirmar que la implementación de un proceso adicional de tratamiento de aguas residuales es fundamental para que la empresa cumpla con los límites permisibles establecidos en la Ley 1955 de 2019 y reduzca su impacto ambiental. Además, dicho proceso ayudaría a mejorar la eliminación del color en los residuos textiles y a reducir la cantidad de contaminantes en los vertimientos de la empresa, lo que mejoraría la relación DQO/DBO y contribuiría al control de la contaminación hídrica. La empresa, al estar comprometida actualmente con el pago de la tasa retributiva por vertimientos, tiene la responsabilidad de implementar medidas que reduzcan su impacto ambiental y contribuyan al bienestar de la sociedad y del medio ambiente. En consecuencia, la implementación de un proceso adicional de tratamiento de aguas residuales se convierte en una medida necesaria y urgente para la empresa, que deberá buscar soluciones eficientes y económicamente viables para cumplir con sus compromisos ambientales y legales.
- La combinación del proceso coagulación/floculación con otros procesos puede ser rentable en términos de costos, ya que la coagulación/floculación puede reducir la carga orgánica y eliminar parte de los contaminantes antes de aplicar los POA, lo que puede reducir el costo total del tratamiento. El tratamiento más adecuado debido a su efectividad y bajo costo para

complementar el proceso de Coagulación-Floculación es el proceso Fenton, que, aunque hay otros procesos con una mayor remoción del DQO, con el porcentaje que se obtiene en el proceso Fenton, se lograría cumplir y estar dentro del rango del límite máximo permisible de la norma para este parámetro (DQO).

- Se puede concluir que los procesos secuenciales de tratamiento Coagulación – Floculación + Fenton y Coagulación – Floculación + Foto Fenton cumplen con las exigencias que se tienen en la legislación colombiana, ya que cumpliría con las características fisicoquímicas que exige la norma para vertimientos al alcantarillado público.

Referencias

- Amor, C., Torres-Socías, E. De, Peres, J. A., Maldonado, M. I., Oller, I., Malato, S., & Lucas, M. S. (2015). Mature landfill leachate treatment by coagulation/flocculation combined with Fenton and solar photo-Fenton processes. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.036>
- Bilińska, L., & Gmurek, M. (2021). Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions. *Water Resources and Industry*, 26(September). <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100160>
- Blanco, J., Torrades, F., Morón, M., Brouta-Agnés, M., & García-Montaña, J. (2014). Photo-Fenton and sequencing batch reactor coupled to photo-Fenton processes for textile wastewater reclamation: Feasibility of reuse in dyeing processes. *Chemical Engineering Journal*, 240, 469–475. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.101>
- Carranza Jimenez, 2019. ONU: la industria de la moda es la segunda más contaminante del mundo, bit.ly/3jxEK7F
- Cuesta Berrio, H., (2019). Procesos avanzados de oxidación aplicados al tratamiento de las aguas residuales de la industria petroquímica: Fenton y Foto-Fenton. Trabajo de grado. *Universidad Nacional Abierta y A Distancia*. <https://bit.ly/3YY3WCS>
- Del Moro, G., Mancini, A., Mascolo, G., Di laconi, C. (2013) Comparison of UV/H₂O₂ based POA as an end treatment or integrated with biological degradation for treating landfill leachates. *Chemical Engineering Journal*. 218, 133-137
- Engineering Journal, 240, 469–475. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.101>
- Fenton, H.J.H. (1894) Oxidation of Tartaric Acid in Presence of Iron. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 65, 899-910. <https://doi.org/10.1039/CT8946500899>
- Fernández Inca, M.Y. & Quispe Machaca, L.J. (2021). Aplicación del Proceso Electro-Fenton en el Tratamiento de Aguas Residuales Industriales: Una Revisión Sistemática. Trabajo de Grado. *Universidad Cesar Vallejo*. <https://bit.ly/3JosXkN>
- HincapiéMejía, G.M., Ocampo, D., Restrepo, G.M, Marín, J.M, (2011). Fotocatálisis Heterogénea y Foto-Fenton Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel. *Universidad de Antioquia*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000200005>
- García, J.C., Oliveira, J.L., Silva, A.E.C., Oliveira, C.C., Nozaki, J., de Souza, N.E. (2007). Comparative study of the degradation of real textile Effluents by photocatalysis reactions involving UV/TiO₂/H₂O₂ and UV/Fe²⁺/h₂O₂ systems. *Journal of Hazardous Materials*. 147, 105-110

- GilPavas, E. (2020). Advanced Oxidation Processes for the degradation of indigo and organic matter in wastewater from a textile Industry. Tesis Doctoral. *Universidad Nacional de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78505>
- GilPavas, E., Arbeláez-Castaño, P.E., Medina-Arroyave, J.D., Gómez-Atehortúa, C.M. (2018). Tratamiento De Aguas Residuales De La Industria Textil Mediante Coagulación Química Acoplada A Procesos Fenton Intensificados Con Ultrasonido De Baja Frecuencia. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>
- GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 191, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>
- Jácome Burgos, A., Ures Rodríguez, P., & Suárez López, J. (2015). PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (AOPs) (FT-AVA-001). *Inditex*, 1, 1–24. bit.ly/3HUEWXN
- Juárez Avalos, D. (2015). Estudio de la fotorreacción de colorantes azoicos con azúcares. Tesis para obtener la maestría. *Instituto Politécnico Nacional*. <https://bit.ly/3LpOa0w>
- Lapertot, M., Ebrahimi, S., Dazio, S., Rubinelli, A., & Pulgarin, C. (2007). Photo-Fenton and biological integrated process for degradation of a mixture of pesticides. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.07.009>
- Lizama, C. (2008). Celulosa y Textil. *Evaluation*, C, 2005–2008.
- Loaiza Huachaca, M. & Tandaypan Zúñiga, E. K. (2022). Tipos de Procesos de Oxidación Avanzada para Aguas Residuales Procedentes de la Industria Textil: Una Revisión Sistemática. Trabajo profesional de grado. *Universidad César Vallejo*. <https://bit.ly/3zQ4dOh>
- López Fernández, C. (2020) Tiñendo el mundo de contaminación. <https://bit.ly/3yKy6Pu>
- López López, C. (2016) Procesos Físicoquímicos De Oxidaciones Avanzadas (H₂O₂/UV; Fe²⁺/H₂O₂/UV; TiO₂/H₂O₂/UV) y La Mejora Con Un Sistema De Coagulación-Floculación Previo, En El Tratamiento De Aguas Residuales Para La Eliminación De Colorantes, Tesis Doctoral, *Universidad de Granada*. <https://bit.ly/3KUyWjg>
- Lozano Rivas, M., (2012). Curso Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales.
- Marcano, D. (2018). Introducción a la química de los colorantes. *Colección Divulgación Científica y Tecnológica*. <https://bit.ly/3n0K4BG>

- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015. Resolución 0631 del 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones, bit.ly/3wUeWWw
- Monge, Sarai & Torres Pinto, André & Ribeiro, Rui & Silva, Adrián & Bengoa, Christopher. (2018). Manual Técnico sobre Procesos de Oxidación Avanzada aplicados al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales. <https://bit.ly/403KUvt>
- Montano García, J. (2007). Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological Treatments for Commercial Reactive Azo Dyes Removal. *Applied Catalysis*, 262. bit.ly/3X32IKY
- Muñoz Flores, P. (2022). Evaluación de la factibilidad técnica de la fotocatalisis heterogénea en el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria. Tesis Doctoral. *Universidad de Concepción*. <https://bit.ly/3GDftBc>
- Nidheesh, P.V. & Gandhimathi, R. (2012). Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.011>
- Núñez Montoya, Z. E. & Vergara Sanchez, J. (2015). Tratamiento de agua residual textil con colorante negro ácido 52 (na52) empleando procesos avanzados de oxidación: fenton y foto-fenton. Vol. 1 no. 3, Jóvenes Investigadores. <https://bit.ly/3KpPRsw>
- Poyatos, J.M., Muñio, M.M., Almecija, M.C., Torres, J.C., Hontoria, E., Osorio, F. (2010). Advanced Oxidation processes for wastewater treatment: State of the art. *Water air and soil pollution* [doi:10.1007/s11270-009-0065-1](https://doi.org/10.1007/s11270-009-0065-1)
- Rosales Palomino, R. (2017). Reducción del contenido de colorantes en efluentes de la industria textil usando el proceso fenton, Zarate, 2017. Trabajo de grado profesional. *Universidad César Vallejo*. <https://bit.ly/3KU5sSF>
- Salas C, G. (2010) Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím.* Vol. 13 N. 0 1, 2010. Págs. 30-38.
- Torres Andrade, G. F. (2014). Tratamiento De Aguas Residuales Mediante La Combinación De Técnicas Avanzadas De Oxidación Y Biofiltros. *Universidad De Las Palmas De Gran Canaria*, 41–80.
- Varela Reyes, D. J. (2013). Evaluación de la viabilidad técnica y de costos de la aplicación de un proceso avanzado de oxidación foto catalítico en el tratamiento de aguas residuales del sector textil de Bogotá. Trabajo de Maestría. *Universidad Nacional de Colombia*. <https://bit.ly/42heLTK>

- Vedrenne, M., Vasquez-Medrano, R., Prato-Garcia, D., Frontana-Uribe, B. A., & Ibanez, J. G. (2012). Characterization and detoxification of a mature landfill leachate using a combined coagulation-flocculation/photo Fenton treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 205–206, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.060>
- Yonar, T., Kestioglu, K., Azbar, N. (2006). Treatability studies on domestic wastewater using UV/H₂O₂ process, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.04.022>
- Yorkshire España, Colorantes para textiles. <http://bit.ly/42fD6ci>
- Zapata Loaiza, M. I. (2022). Eliminación de los colorantes amaranto, azul de metileno, naranja de metilo, rodamina B y rojo Congo mediante procesos avanzados de oxidación. Trabajo profesional de grado. *Universidad Politécnica de Cartagena*. <https://bit.ly/43vcXHa>
- Zapata Pérez, F.C. (2016). Método de fotocatalisis aplicado para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil. Trabajo de grado. *Universidad Central de Ecuador*. <https://bit.ly/3JovADj>
- Zaruma, P.E., Proal, J.B., Chaires, I., Salas, H.I. (2018). Textile Industry dyes and optimal wastewater Effluents Treatments: A short review. *Instituto Politécnico Nacional*. <http://bit.ly/3JmV6Jc>
- Zhang, Y., Shaad, K., Vollmer, D., & Ma, C. (2021). Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes– A review. *Global Nest Journal*.