

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Fotocatálisis con cobre(II) para la decoloración
de aguas residuales textiles en el distrito de
Hualhuas, Junín 2022**

Didamia Barrios Reyes
Yesica Betzabet Cusiche Medina
Hans Omar Surichaqui Espinoza

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2023

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TESIS

A : FELIPE GUTARRA MEZA
Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : José Vladimir Cornejo Tueros
Asesor de tesis
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de tesis
FECHA : 12 de septiembre de 2023

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado asesor de la tesis titulada: "FOTOCATÁLISIS CON COBRE(II) PARA LA DECOLORACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES EN EL DISTRITO DE HUALHUAS, JUNÍN 2022", perteneciente a los estudiantes DIDAMIA BARRIOS REYES; YESICA BETZABET CUSICHE MEDINA; HANS OMAR SURICHAQUI ESPINOZA, de la E.A.P. de INGENIERIA AMBIENTAL; se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 13% de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI N
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
(Nº de palabras excluidas: 0) SI N
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI N

En consecuencia, se determina que la tesis constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido de la tesis sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,



José Vladimir Cornejo Tueros
Asesor de tesis

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, HANS OMAR SURICHAQUI ESPINOZA, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 70165681, de la E.A.P. de INGENIERIA AMBIENTAL de la Facultad de INGENIERÍA la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "FOTOCATÁLISIS CON COBRE(II) PARA LA DECOLORACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES EN EL DISTRITO DE HUALHUAS, JUNÍN 2022", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

12 de Setiembre de 2023

H.OMAR

HANS OMAR SURICHAQUI ESPINOZA

DNI. No. 70165681

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, Didamia Barrios Reyes, identificada con Documento Nacional de Identidad No. 62305902, de la E.A.P. de Ingeniería ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "**FOTOCATÁLISIS CON COBRE(II) PARA LA DECOLORACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES EN EL DISTRITO DE HUALHUAS, JUNÍN 2022**", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

12 de Setiembre de 2023.



DIDAMIA BARRIOS REYES

DNI. No. 62305902

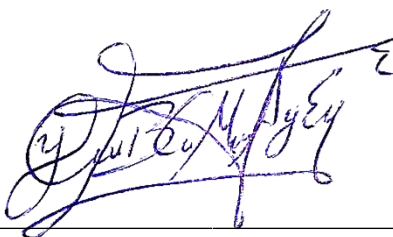
DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, Yesica Betzabet Cusiche Medina, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 76696682, de la E.A.P. de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "FOTOCATÁLISIS CON COBRE(II) PARA LA DECOLORACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES EN EL DISTRITO DE HUALHUAS, JUNÍN 2022", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

12 de Setiembre de 2023.



YESICA BETZABET CUSICHE MEDINA

DNI. No. 76696682

FOTOCATÁLISIS CON COBRE(II) PARA LA DECOLORACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES EN EL DISTRITO DE HUALHUAS, JUNÍN 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	1library.co Fuente de Internet	<1%

9

Dong, Guohui, Zhihui Ai, and Lizhi Zhang. "Total aerobic destruction of azo contaminants with nanoscale zero-valent copper at neutral pH: Promotion effect of in-situ generated carbon center radicals", *Water Research*, 2014.

Publicación

<1 %

10

Submitted to unbosque

Trabajo del estudiante

<1 %

11

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

12

Nuket Kartal Temel, Münevver Sökmen. "New catalyst systems for the degradation of chlorophenols", *Desalination*, 2011

Publicación

<1 %

13

repositorio.cientifica.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

14

eprints.ucm.es

Fuente de Internet

<1 %

15

bolsa-trabajo.upads.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

16

pesquisa.bvsalud.org

Fuente de Internet

<1 %

17

pt.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

18	ri.uaemex.mx Fuente de Internet	<1 %
19	Submitted to Universidad Internacional de la Rioja Trabajo del estudiante	<1 %
20	revistas.itm.edu.co Fuente de Internet	<1 %
21	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
23	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
24	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1 %
25	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	ruidera.uclm.es Fuente de Internet	<1 %
27	Submitted to Shaikha Hessa Girls' School Trabajo del estudiante	<1 %
28	lawetnet.org Fuente de Internet	<1 %

29 repositorio.upads.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

30 pubs.rsc.org <1 %
Fuente de Internet

31 Zhanwei Yang, Shujuan Yu, Hualei Chen, Xiaobing Guo, Pingyao Cai, Hecheng Meng. "One-step electrogelation of pectin hydrogels as a simpler alternative for antibacterial 3D printing", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022 <1 %
Publicación

32 doczz.es <1 %
Fuente de Internet

33 zaloamati.azc.uam.mx <1 %
Fuente de Internet

34 pdfcoffee.com <1 %
Fuente de Internet

35 repositorio.untumbes.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

36 repositorio.upa.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

37 worddomination.com <1 %
Fuente de Internet

38 www.fao.org

Fuente de Internet

<1 %

39

www.oalib.com

Fuente de Internet

<1 %

40

Tovia Elizabeth Martirosian. "Acetato de medroxiprogesterona de liberación prolongada: Un factor de riesgo para la estenosis del cuello uterino tras el tratamiento de la neoplasia intraepitelial cervical con el procedimiento de escisión electroquirúrgica con asa? :", Journal of Lower Genital Tract Disease, 01/2010

Publicación

<1 %

41

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

<1 %

42

WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "PMA Conversión a Ciclo Combinado de la Central Termoeléctrica Kallpa-IGA0001335", R.D. N° 335-2009-MEM/AAE, 2021

Publicación

<1 %

43

bibliotecadigital.udea.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

44

repositorio.udec.cl

Fuente de Internet

<1 %

45	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
46	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
47	www.jove.com Fuente de Internet	<1 %
48	www.mdpi.com Fuente de Internet	<1 %
49	www.munisjl.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
50	www.studocu.com Fuente de Internet	<1 %
51	yalma.fime.uanl.mx Fuente de Internet	<1 %
52	T. Rivas, B. Silva, B. Prieto. "Medida de la eficacia de dos hidrofugantes aplicados a rocas graníticas", <i>Materiales de Construcción</i> , 2010 Publicación	<1 %
53	Submitted to Unidad Educativa Fiscomisional Calasanz Trabajo del estudiante	<1 %
54	burjcdigital.urjc.es Fuente de Internet	<1 %

dokumen.pub

55

Fuente de Internet

<1 %

56

es.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

57

repositorio.upeu.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

58

www.iqb.es

Fuente de Internet

<1 %

59

www.mexpolimeros.com

Fuente de Internet

<1 %

60

www.minem.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

61

www.repositorio.ufal.br

Fuente de Internet

<1 %

62

www.scielo.org.co

Fuente de Internet

<1 %

63

KEVIN OMAR S.A.C. "EIA-SD para el Desarrollo de la Acuicultura de la Mediana y Gran Empresa Mediante el Cultivo de Concha de Abanico en Sistema de Fondo a Desarrollarse en el Lote N° 83-A, con una Extensión de 50.00 ha. Ubicado en la Zona Parachique de la Bahía Sechura, Distrito y Provincia de Sechura, Piura-IGA0020937", R.D. N° 00110-2022-PRODUCE/DGAAMPA, 2022

Publicación

<1 %

64	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
65	repositorio.ufsc.br Fuente de Internet	<1 %
66	ECOLAB S.R.L.. "EIA del Proyecto de Perforación de 575 Pozos de Desarrollo en el Lote X-IGA0002279", R.D. N° 499-2015-MEM/DGAAE, 2020 Publicación	<1 %
67	Edgardo Angulo M, Grey Castellar O, Ma Mercedes Cely B, Lilia Ibáñez S, Lidys Prasca M. "Decoloración de aguas residuales de una industria de pinturas por la microalga <i>Chlorella sp</i>", Revista MVZ Córdoba, 2017 Publicación	<1 %
68	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Activo

ASESOR

Ing. José Vladimir Cornejo Tueros

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Continental.

A nuestro asesor, PhD. José Vladimir Cornejo Tueros.

A las personas que han contribuido de manera incondicional con el desarrollo de la investigación.

DEDICATORIA

A Dios, quién nos guía y nos da sabiduría, a mis queridos padres, Santiago Barrios Huamán y Antonia Reyes Bernilla, y a mis hermanos por su apoyo incondicional.

Bach. Didamia Barrios Reyes.

A Dios y a mis padres, Alcides Cusiche Sánchez y Elizabeth Medina Yalopalin, porque ellos estuvieron siempre a mi lado brindándome su apoyo incondicional.

Bach. Yesica Betzabet Cusiche Medina.

A mi padre que está en el cielo, Ovidio Fortunato Surichaqui Canchaya, a mi madre Sabina Mercedes Espinoza y a mis hermanos y hermanas por su apoyo.

Bach. Hans Omar Surichaqui Espinoza.

ÍNDICE

ASESOR	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.2. Formulación del problema	5
1.1.2.1. Problema general.....	5
1.1.2.2. Problemas específicos	5
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Justificación e importancia.....	6
1.3.1. Justificación ambiental.....	6
1.3.2. Justificación social	8
1.3.3. Importancia.....	9
1.4. Hipótesis y descripción de variables	10
1.4.1. Hipótesis.....	10
1.4.1.1. Hipótesis general	10
1.4.2. Descripción de variables.....	10

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2.1. Antecedentes del problema	12
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	12
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	17
2.2. Bases teóricas	20
2.2.1. Aguas residuales industriales	20
2.2.2. Procesos para el tratamiento de aguas residuales textiles	24
2.2.3. Procesos de oxidación avanzada	26
2.2.4. Proceso Fenton	30
2.2.5. Proceso foto-Fenton	32
2.2.6. Proceso tipo foto-Fenton	34
2.2.7. Colorantes	37
2.3. Definición de términos básicos	42
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	44
3.1. Método y alcance de la investigación	44
3.1.1. Método de la investigación	44
3.1.2. Tipo de investigación.....	44
3.1.3. Nivel de la investigación	45
3.2. Diseño de la investigación	45
3.3. Población y muestra	46
3.3.1. Población.....	46
3.3.2. Muestra	47
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	47
3.4.1. Técnicas.....	47
3.4.2. Instrumentos.....	48
3.5. Metodología de experimentación.....	48
3.5.1. Reactivos, materiales y equipos utilizados	48
3.5.2. Muestreo	49

3.5.3.	Teñido de la lana de llama	51
3.5.4.	Determinación de la dosis de cobre(II) y pH de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART	52
3.5.5.	Parámetros físicos de las ART	53
3.5.6.	Análisis de los efectos de la fotocatalisis con cobre(II) en la decoloración de las ART	54
3.5.7.	Evaluación de eficiencia de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART	54
3.5.8.	Determinación de la dosis de cobre(II) y pH óptimo de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART	55
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		57
4.1.	Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	57
4.1.1.	Determinación de la dosis de cobre(II) y pH de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART	57
4.1.2.	Análisis de los efectos de la fotocatalisis con cobre(II) en la decoloración de ART	59
4.1.3.	Evaluación de la eficiencia de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de ART	60
4.1.4.	Determinación de la dosis de cloro(II) y pH óptimo de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART	61
4.2.	Prueba de hipótesis	64
4.3.	Discusión de resultados.....	66
CONCLUSIONES.....		71
RECOMENDACIONES.....		72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		73
ANEXOS		78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes orgánicos de las aguas residuales.	21
Figura 2. Impactos ecotoxicológicos de las aguas residuales textiles que contienen colorantes en el medio ambiente y los microorganismos vivos.	24
Figura 3. Tipos de procesos de oxidación avanzada.....	28
Figura 4. Mecanismo Fenton.	32
Figura 5. Mecanismo foto-Fenton.	33
Figura 6. Proceso foto-Fenton.	34
Figura 7. Mecanismo de generación de radicales hidroxilo por el proceso Fenton y tipo Fenton.	35
Figura 8. Diversas categorías de colorantes y sus posibles aplicaciones industriales.....	38
Figura 9. Clasificación de los colorantes según cargas iónicas.....	39
Figura 10. Combinaciones de los tratamientos en el diseño factorial 3 ²	46
Figura 11. Lugar de venta de la empresa textil.	50
Figura 12. Ambiente de teñido.	50
Figura 13. Teñido de lana de llama.....	51
Figura 14. Diagrama de las corridas.	53
Figura 15. Media de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.....	57
Figura 16. Efectos de la dosis de cobre(II) y pH en la decoloración de las ART con fotocatalisis con cobre(II).	60
Figura 17. Gráfica de contorno de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.	63
Figura 18. Gráfica de superficie de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.	63
Figura 19. Optimización de respuesta de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.....	64
Figura 20. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.....	11
Tabla 2. Características de las aguas residuales de la industria textil compuesta.....	23
Tabla 3. Procesos de oxidación avanzada.....	29
Tabla 4. Valores de las variables independientes y sus niveles codificados.	46
Tabla 5. Parámetros físicos de las ART.....	54
Tabla 6. Principales estadísticos descriptivos del tratamiento de ART con la fotocatalisis con cobre(II).	58
Tabla 7. Color de las ART después del tratamiento por fotocatalisis con cobre(II).....	59
Tabla 8. Color de las ART después del tratamiento por fotocatalisis con cobre(II).....	61
Tabla 9. Resumen del modelo.	62
Tabla 10. Coeficientes codificados.....	62
Tabla 11. Análisis de varianza.	65

RESUMEN

En la investigación se aplicó fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín. En los experimentos se usaron 600 mL de aguas residuales textiles (ART) del teñido de lana de llama de color amarillo y en el tratamiento se manipuló la dosis de cobre(II) (10, 30 y 50 mg/L) y el pH (4,4; 7,0 y 11,0), al cual se agregó H₂O₂ bajo incidencia de la radiación solar y agitación durante 2 h, luego del tratamiento se determinó el color del efluente. La mayor decoloración de las ART con la fotocátalisis con cobre(II) fue de 88,30 % con una dosis de cobre(II) de 30 mg/L y un valor de pH de 7,0, mientras que los valores óptimos fueron 38,6869 mg/L y 7,5333 respectivamente, al cual el máximo porcentaje de decoloración estimado fue 86,0385 % ± 0,9730. El efecto de la dosis de cobre(II) fue positivo, puesto que a mayor dosis la decoloración de las ART se incrementa, mientras que del pH fue cuadrático, ya que presentó un valor máximo de 79,8450 % a pH 7 y para valores menores o mayores la decoloración disminuye. A través de la fotocátalisis con cobre(II) se logró una buena decoloración de las ART, pero el color del efluente tratado fue mayor a 100 PCU y no puede utilizarse para la extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales, así como tampoco para regar vegetales ni para consumo de los animales. El uso que puede darse es para obtener agua potable mediante procesos convencionales o avanzados.

Palabras clave: aguas residuales textiles, fotocátalisis con cobre(II), anilina.

ABSTRACT

In the investigation, photocatalysis with copper(II) was applied for the bleaching of textile wastewater in the district of Hualhuas, Junín. In the experiments, 600 mL of textile wastewater (ART) from the dyed yellow llama wool were used and in the treatment the dose of copper(II) (10, 30 and 50 mg/L) and the pH (4.4; 7.0 and 11.0), to which H₂O₂ was added under the incidence of solar radiation and reduction for 2 h, after the treatment the color of the effluent accelerated. The highest discoloration of ART with copper(II) photocatalysis was 88.30 % with a copper(II) dose of 30 mg/L and a pH value of 7.0, while the optimal values were 38.6869 mg/L and 7.5333 respectively, at which the maximum percentage of estimated discoloration was 86.0385 % ± 0.9730. The effect of the copper(II) dose was positive, since at a higher dose the discoloration of the ART increases, while the pH was quadratic, since it presented a maximum value of 79.8450 % at pH 7 and for values minor or major discoloration decreases. Through photocatalysis with copper(II) a good discoloration of the ART was achieved, but the color of the treated effluent was greater than 100 PCU and it cannot be used for extraction, cultivation and other marine-coastal and continental activities, as well as neither to water vegetables nor for animal consumption. The use that can be given is to obtain drinking water through conventional or advanced processes.

Keywords: textile wastewater, copper(II) photocatalysis, aniline.

INTRODUCCIÓN

La crítica escasez de recursos hídricos es preocupación en el mundo, debido al rápido crecimiento de la población y aumento de los niveles de contaminación del agua (1). Esta situación es por el veloz crecimiento de la población mundial e industrialización generalizada. La descarga continua de contaminantes orgánicos como colorantes en los recursos hídricos tiende a la contaminación del agua y afecta a la salud humana y vida acuática en los cuerpos de agua. Hay varios tipos de contaminantes que incluyen inorgánicos, orgánicos, nutrientes y escorrentía agrícola, patógenos, etc. Los contaminantes orgánicos llevan una parte importante debido a su mayor persistencia, fuerte resistencia y efecto significativo en la salud humana. La mayoría de los colorantes de la actividad industrial se liberan directamente en los cuerpos de agua y producen un color no deseado que provoca contaminación no estética, eutrofización, perturbaciones y restricción de las actividades biológicas de la vida acuática (2).

La eficiencia de eliminación de los contaminantes de preocupación emergente (CE) depende principalmente de la biodegradabilidad y características de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Pero, una PTAR convencional fue diseñada para tratar sustancias de carbono, nitrógeno y fósforo biodegradables, además de microorganismos, y no CE. En consecuencia, los tratamientos aplicados se han mostrado ineficaces para eliminarlos y los efluentes tratados incorrectamente se liberan al ambiente acuático, además siendo empleados posteriormente para fines de regadío, donde dicho recurso hídrico alterado puede generar consecuencias negativas para las personas, el suelo, los cultivos y la biota (3).

Especialmente la industria textil genera grandes cantidades de efluentes contaminados y se estima que entre el 10 % al 15 % de colorantes utilizados se pueden encontrar en las aguas residuales, por lo que el tratamiento de estos efluentes es de gran importancia. Se usaron procesos químicos, biológicos y fisicoquímicos para tratar aguas residuales con colorantes, pero son limitados por sus costos, se intentaron desarrollar tratamientos biológicos eficiente y rentable pero no han tenido éxito.

Dentro del proceso de oxidación avanzada (POA), el proceso Fenton se aplica por su poder de degradación de contaminantes, pero la limitante es el pH (entre 2-4) necesario para impedir la formación de precipitados de oxihidróxidos de hierro y lograr una alta eficiencia en el tratamiento. Por otra parte, para descargar el efluente ácido se tiene que

neutralizar y con este proceso se produce lodos de hierro. Las opciones para superar este inconveniente son varios, una de ellas es utilizar otro catalizador como el Cu(II) en lugar del Fe(II), el objetivo es operar en valores de pH próximos a 7 y el Cu(II) es soluble a esas condiciones.

Para lograr resultados favorables en el tratamiento de vertidos de origen textil, en la investigación se abordó la aplicación de la fotocatalisis con cobre(II) para decolorar dichos vertidos, para cumplir ello, se determinó y analizó el efecto de la dosis de cobre(II) y pH, y evaluó la eficiencia de la fotocatalisis con cobre(II). La hipótesis indica que se produce una decoloración significativa por la aplicación de la fotocatalisis con cobre(II) de los mencionados vertidos generados en Hualhuas, Junín.

El informe contiene una sección inicial, así como una final abordando a capítulos estructurados. El primer capítulo aborda el planteamiento del estudio que incluye los problemas, objetivos, justificación e importancia e hipótesis, mientras que en el segundo se exponen los fundamentos teóricos además de los antecedentes y la definición de términos. El Capítulo III expone el marco metodológico y en el cuarto capítulo se presentan los resultados, además de la correspondiente prueba de hipótesis y discusión de lo alcanzado. El informe finaliza presentando a las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

La crítica escasez de recursos hídricos es preocupación en el mundo, debido al veloz incremento de la población y aumento de los niveles de contaminación del agua. Por lo tanto, garantizar que los recursos hídricos proporcionen volúmenes suficientes de agua limpia y de alta calidad es una tarea importante en la actualidad (1). Esta situación se debe a que los principales responsables es el rápido aumento de la población mundial y la industrialización generalizada. La descarga continua de contaminantes orgánicos como colorantes en los recursos hídricos tiende a la contaminación del agua y afecta no solo a la salud humana sino también a la vida acuática en los cuerpos de agua. Las fuentes puntuales (refinerías, minas, fábricas, centrales eléctricas, etc.) son más responsables de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas que las fuentes difusas (automóviles, autobuses y trenes, etc.). Hay varios tipos de contaminantes que incluyen inorgánicos (iones de metales pesados, óxidos de metales, complejos de metales, sales, etc.), orgánicos (colorantes, pesticidas, ingredientes farmacéuticos, fertilizantes, fenoles, surfactantes, etc.), nutrientes y escorrentía agrícola, patógenos, etc., entre estos, los contaminantes orgánicos llevan una parte importante debido a

su mayor persistencia, fuerte resistencia y efecto significativo en la salud humana. La mayoría de los colorantes de la actividad industrial se liberan directamente en los cuerpos de agua y producen un color no deseado que provoca contaminación no estética, eutrofización, perturbaciones y restricción de las actividades biológicas de la vida acuática (2).

Ante esta situación, la contaminación del agua es uno de los más grandes retos del hombre. Mientras se desarrollan nuevas opciones de tratamiento para la eliminación de compuestos nocivos del agua, la mejora de las técnicas analíticas permite simultáneamente la detección e identificación de contaminantes de preocupación emergente (CE). Por esta razón, en la Directiva 2013/39/UE se establecieron límites para algunas sustancias -sustancias prioritarias (PS)- que impactan al ambiente, los ecosistemas e incluso al hombre. Además, se generó una Lista de Vigilancia de contaminantes de preocupación emergente en la Decisión 2015/495/UE de marzo de 2015 y actualizado por la Decisión (UE) 2020/1161 de 4 de agosto de 2020. Esta lista incluye sustancias que deben controlarse en los compartimentos acuáticos de Europa, ya que algunas pueden tener efectos toxicológicos en las masas de agua, aunque sus efectos reales aún no se conocen bien.

Las sustancias prioritarias (PS) y contaminantes emergentes (CE) suelen estar presentes en cuerpos de agua en concentraciones muy bajas, orden de $\mu\text{g/L}$, y por lo que se clasifican como microcontaminantes (MP), sin embargo, para ciertas sustancias, incluso estas pequeñas concentraciones tienen efectos negativos en los seres vivos. A pesar de que su concentración es demasiado baja para causar toxicidad directa, una posible consecuencia de la exposición a largo plazo es la toxicidad crónica. También se han relacionado con efectos cancerígenos y tienden a bioacumularse. La principal vía para que estos microcontaminantes lleguen a las masas de agua y con ello al hombre, se da por el vertimiento derivado de PTAR urbanas. Estas sustancias, que son muy persistentes, están presentes en efluentes industriales, domiciliarios y hospitalarios (entre otras fuentes), que se dirigen a infraestructuras de tratamiento convencionales. Estas plantas no están diseñadas específicamente para eliminar microcontaminantes y, como consecuencia, algunos (o sus

respectivos metabolitos) pasan la planta de tratamiento y se descargan con el efluente final tratado a aguas superficiales u otros compartimentos de agua (4).

Específicamente las aguas residuales industriales (ARI) representan un grave peligro para el medio ambiente acuático, aéreo y del suelo, especialmente con respecto a la salud humana y animal. Estas aguas pueden contener metales pesados, emulsiones oleosas, compuestos inorgánicos y orgánicos, los cuales son difíciles de remover por su solubilidad en agua o por la presencia de compuestos persistentes y recalcitrantes. Estos compuestos pueden incluir aromáticos, azufre, nitrógeno, oxígeno, compuestos de doble unión y compuestos altamente moleculares. Los límites de contenido de contaminantes en las ARI, aplicados por las legislaciones, ha estado disminuyendo durante años, lo que obliga a un tratamiento más profundo de las ARI para disminuir la concentración de contaminantes antes de su descarga (5).

La remoción, considerando su eficiencia, de contaminantes distribuidos en vertidos hospitalarios y CE se da en función a diversas medidas, donde se considere a la capacidad de degradación orgánica así como a sus características químicas y físicas, a las propias de la PTAR considerando factores operacionales y ambientales, etc., no obstante, aquellas infraestructuras de orden convencional tienden por presentar un diseño orientado a remover compuestos orgánicos y microorganismos que se consideren degradables en forma viable, pero presentan limitaciones para remover elementos trazas que correspondan a bioactivos (farmacéuticos), por lo que los tratamientos utilizados han demostrado ser ineficaces para eliminarlos. En el caso que estas aguas residuales sin tratar se descargan y se empleen para fines como el riego, se estarían generando riesgos para el sistema hídrico, para las personas, el suelo, los cultivos y la biota (3).

Especialmente la industria textil y de colorantes generan grandes cantidades de efluentes contaminados. Se estima que entre el 10% y 15% del total de colorantes utilizados en la producción de textiles y el proceso de teñido se pueden encontrar en las aguas residuales. Dado que algunos de los compuestos contenidos en estos efluentes son tóxicos, mutagénicos o incluso cancerígenos, el tratamiento de las aguas residuales es

trascendental. Se han utilizado diversos procesos químicos, biológicos y fisicoquímicos para tratar los desechos que contienen colorantes. Estos incluyen métodos convencionales como la coagulación, la floculación, la sorción, la descomposición electroquímica o la degradación oxidativa, sin embargo, los métodos convencionales generalmente están limitados por los altos costos. Algunos de ellos incluso producen lodos como subproducto y, por lo tanto, se necesita un tratamiento o deposición adicional. Por otra parte, el uso de procesos microbianos para la eliminación de colorantes está limitado por su lento ritmo causado por la complejidad de los sistemas biológicos. Los intentos de desarrollar un método de tratamiento biológico eficiente y rentable hasta ahora no han tenido éxito.

La reacción de Fenton basada en Fe(II) y sus modificaciones han recibido considerable atención como herramientas para la decoloración de colorantes sintéticos, sin embargo, su requisito estricto para condiciones ácidas es el principal factor limitante. Se ha prestado menos atención a reacciones similares basadas en Cu(II), aunque se han utilizado sistemas generadores de radicales basados en cobre para la degradación de lignina o hidrocarburos aromáticos policíclicos (6).

Dentro de los POA, el proceso Fenton es aplicado por su potencial de degradación de diversos contaminantes; pero una limitante es el rango del pH (entre 2-4, óptimo de 2,8) necesario para impedir la formación de precipitados de oxihidróxidos de hierro y lograr una alta eficiencia en el tratamiento. Por otra parte, para descargar el efluente ácido se tiene que neutralizar y en este proceso sucede una acumulación de lodos de hierro. Las opciones que se investigaron son diversas para superar este inconveniente, una de ellas es utilizar otro catalizador como el Cu(II) en lugar del Fe(II), el objetivo es operar en valores de pH próximos a 7 y el Cu(II) es soluble a esas condiciones.

La fotocatalisis con Cu(II) para la decoloración de aguas residuales textiles requiere energía para mejorar significativamente el efecto del catalizador, en la mayoría de estudios utilizan lámparas UV para ello, empero involucra invertir en su compra y consumo de energía durante el tratamiento, así no se aprovecha el nivel de radiación que es significativo para Junín.

Mayormente en las investigaciones utilizan efluentes textiles sintéticos que son preparados de la mezcla del colorante y agua destilada, no contiene otras sustancias que pueden afectar los resultados o interferir el tratamiento, por lo cual la decoloración es alta.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Es posible decolorar las aguas residuales textiles aplicando el método de fotocátalisis con cobre(II) en el distrito de Hualhuas, Junín?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la dosis de cobre(II) y pH de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?
- ¿Cuáles son los efectos de la fotocátalisis con cobre(II) en la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?
- ¿Cuál es la eficiencia de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar la decoloración por la aplicación de la fotocátalisis con cobre(II) en las aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la dosis de cobre(II) y pH de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.
- Analizar los efectos de la fotocátalisis con cobre(II) en la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.
- Evaluar la eficiencia de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación ambiental

Muchas aguas residuales de procesos industriales contienen contaminantes orgánicos que son tóxicos y poco biodegradables cuando la concentración es demasiado alta para tratamientos biológicos directos. Por otro lado, las concentraciones de estos agentes suelen ser tan pequeñas que la recuperación clásica (como centrifugación, floculación, filtración, etc.) no es económicamente factible.

La oxidación química trata de lograr la mineralización completa de los contaminantes a CO₂, H₂O e inorgánicos o su conversión en sustancias.

Estos contaminantes que no pueden ser degradados con tratamientos biológicos, también se caracterizan por una alta estabilidad química y/o dificultad para ser mineralizados completamente. En estos casos, es necesario adoptar sistemas reactivos más efectivos que los utilizados en los procesos de purificación convencionales. La aplicación, en contaminantes orgánicos, de la oxidación directa se puede realizar bajo una variedad de condiciones, que van desde condiciones ambientales hasta oxidación con agua supercrítica a temperaturas y presiones muy altas (7).

Los límites de contenido de contaminantes en las aguas residuales industriales (ARI), aplicados por las legislaciones, han ido reduciendo durante los años, lo que obliga a un tratamiento más profundo de las ARI para disminuir la concentración de contaminantes antes de su descarga. Se han utilizado tecnologías de tratamiento como separación gravitacional, centrifugación, coagulación, flotación, adsorción, métodos biológicos y de filtración, oxidación térmica, entre otros, para cumplir con los requisitos de la legislación, sin embargo, generan subproductos como lodos, jarabes o sales que necesitan un tratamiento posterior que puede ser costoso y peligroso. Además, algunos tipos de efluentes no pueden ser tratados directamente por tecnologías biológicas debido a la presencia de altos niveles de compuestos recalcitrantes, como hidrocarburos aromáticos. Por lo tanto, uno de los principales objetivos del siglo es desarrollar alternativas tecnológicas de tratamiento de los ARI simples, seguras, económicas, eficientes y, lo más importante, no dañinas para el medio ambiente (5).

De dicho modo, la sociedad debe centrarse en la remoción de dichos aspectos desequilibrantes. Diversos métodos empleados para eliminar compuestos orgánicos tales como biodegradación, oxidación química y conversión/combustión electroquímica, ozonización, sistemas Fenton o foto-Fenton, ultrasonidos, adsorción sobre carbones activados, ósmosis inversa, fotólisis (UV), fotólisis (UV /H₂O₂), y procesos de oxidación avanzada (POA). De estos, los POA resultan ser métodos efectivos para degradar los contaminantes orgánicos. Implica la formación de especies oxidantes altamente reactivas para oxidar los contaminantes (2).

Se han aplicado varios tratamientos convencionales al tratamiento de agua y aguas residuales que contienen CE, sin embargo, su presencia continua en el medio ambiente pone de relieve la ineficiencia de esos procesos. Por lo tanto, las tecnologías de eliminación no convencionales son alternativas para mejorar la absorción de estos compuestos. En esta situación, los procesos de oxidación avanzados (POA) son alternativas prometedoras por su nivel de eficiencia alta en la degradación de los CE. Se fundamentan en la generación de radicales hidroxilo (\bullet HO) no selectivos y altamente oxidantes, capaces de convertir contaminantes recalcitrantes en CO₂, H₂O y otros compuestos menos nocivos. Aunque estos procesos se pueden

aplicar individualmente, se han empleado procesos combinados como UV/H₂O₂, UV/US, UV/H₂O₂/US, UV-Fenton, foto-electro-Fenton y UV/TiO₂ para optimizar los resultados de eliminación (8).

Varios tratamientos han demostrado su capacidad y eficacia a la hora de eliminar microcontaminantes, ya sea por mineralización completa o por transformación en subproductos posiblemente menos nocivos. Dichos tratamientos incluyen POA, utilizando peróxido de hidrógeno (H₂O₂), ozono (O₃), oxígeno (O₂), entre otros oxidantes. La ozonización, la radiación ultravioleta (UV) combinada con O₃ o H₂O₂ y los procesos que se basan en la reacción Fenton son algunos de los sistemas más estudiados, y en este campo están surgiendo otros tratamientos, como la fotocatalisis heterogénea. Los tratamientos convencionales, como la adsorción con carbón activado y filtración por membrana, también han mostrado potencial para eliminar los PS y los CE (4). El problema es que no degradan el contaminante solo separan del efluente, ello involucra un disposición final o almacenamiento de los contaminantes.

Utilizar un proceso tipo Fenton con Cu²⁺ como catalizador, reduce impactos ambientales negativos producto del vertimiento de los efluentes textiles al alcantarillado o cuerpos de agua cercanos a la empresa textil. El efluente tratado prácticamente está libre de contaminante porque los POA mineralizan los colorantes. Otro aporte de este proceso es que no requiere ácidos en su empleo (HCl, H₂SO₄, etc.) para alcanzar el pH demandado en el proceso Fenton, de modo que se reducen gastos por la demanda de estos reactivos. Finalmente, con la investigación se aprovecha la energía solar que es alta, limpia, disponible y no requiere ninguna inversión.

1.3.2. Justificación social

La creciente población mundial con crecientes actividades industriales y hábitos de consumo ha posicionado la protección del medio ambiente como un tema prioritario y un factor crucial para varios procesos industriales, los cuales deberán cumplir con los requerimientos del desarrollo sustentable para las sociedades modernas (7).

La aplicación del proceso que se investiga beneficiará al medio ambiente porque se mitigará la contaminación actual generada por estos efluentes textiles y que el efluente tratado pueda ser utilizado en riego (fin agrícola) así como en forma de bebida de la fauna (Categoría 3), de modo que no se esté en contacto con contaminantes, ni se consuma productos de la siembra regados con agua contaminada, por lo cual se evitará daños a la salud o enfermedades. La industria textil puede reutilizar el efluente tratado para el teñido y así minimizar el consumo de agua.

1.3.3. Importancia

En la región Junín existen varias empresas textiles donde tiñen principalmente prendas de lana o algodón, para ello utilizan diversos reactivos químicos, colorantes y aditivos, que forman parte de los efluentes y la descarga genera impactos negativos al medio ambiente y al hombre.

Los colorantes orgánicos sintéticos se usan bastante en la industria textil comercial y, por lo tanto, prevalecen en nuestra vida diaria. De importancia cada vez mayor es que los vertidos que presenten alteraciones por la presencia de colorantes en los ecosistemas pueden causar serios problemas debido a su toxicidad, anti-biodegradabilidad y carcinogenicidad potencial. Por ello, es imperativo desarrollar tecnologías de remediación ambiental que mitiguen la contaminación y que eliminen de manera efectiva los contaminantes orgánicos de los vertidos residuales (9).

Por su estructura o características de los colorantes, es necesario realizar el tratamiento a los efluentes textiles para que al descargar al medio ambiente no impacte negativamente al ambiente y en la salud del hombre.

Los procesos convencionales no degradan colorantes porque son recalcitrantes, por lo cual no hay otra opción de desarrollar nuevos procesos que alcancen eficiencias altas en la decoloración de vertidos textiles, en este aspecto los POA son recomendables.

Con el proceso tipo o similar al foto-Fenton se logra efluentes tratado sin contaminantes recalcitrantes y se evita utilizar ácidos para lograr el pH

recomendado en el proceso Fenton y foto-Fenton. Por otra parte, es positivo usar una fuente de energía renovable, como la solar, necesaria para el proceso que se investiga.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis

1.4.1.1. Hipótesis general

*H₀ = El efecto de la dosis de cobre(II) y pH no están presentes en la decoloración de las ART por fotocátalisis con cobre(II).

*H₁ = El efecto de la dosis de cobre(II) y pH están presentes en la decoloración de las ART por fotocátalisis con cobre(II).

1.4.2. Descripción de variables

- Variable dependiente:
 - Porcentaje de decoloración de las ART.
- Variables independientes:
 - Los factores de la fotocátalisis con cobre(II), considerando que no son función de otro factor, son:
 - Dosis de cobre(II).
 - pH.

Tabla 1. *Matriz de operacionalización de variables.*

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de recolección de datos
<p>Variable dependiente: Porcentaje de decoloración de las ART.</p>	<p>Se da por la disminución del color de vertidos que se alcanza tras aplicar mecanismos fisicoquímicos y biológicos (6).</p>	<p>Se midió el color de las ART antes y después de la aplicación de la fotocatálisis con cobre(II) de forma que se alcance a identificar el % de decoloración.</p>	<p>Porcentaje de decoloración.</p>	<p>Porcentaje de decoloración (%).</p>	<p>Técnica: análisis documental, experimento.</p>
<p>Variable independiente: Fotocatálisis con cobre(II): *Dosis de cobre(II). *pH.</p>	<p>Proceso donde los radicales hidroxilo se forman no solo en presencia de iones Fe(II), sino que también se pueden formar en presencia de otros cationes metálicos con cobre(II).</p>	<p>Dosis de cobre(II) es la masa de cobre(II) por volumen de ART en el tratamiento con la fotocatálisis con cobre(II). pH es el potencial de hidrógeno y mide la acidez o alcalinidad inicial de las ART.</p>	<p>Dosis de cobre(II). pH.</p>	<p>Dosis de cobre(II) (mg/L). pH (adimensional).</p>	<p>Instrumentos: colorímetro, balanza analítica, pHmetro, cronómetro.</p>

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes internacionales

En el estudio de Fang *et al.* (10) desarrollaron una nanolámina de CuO como catalizador reciclable tipo Fenton preparado a partir de efluentes residuales de Cu(II) simulados mediante una reacción alcalina de H₂O₂. Para evaluar el grado de degradación del catalizador con irradiación de luz visible a la temperatura del efluente de 30°C, agregaron 10 mg de las nanoláminas de CuO, 60 mL de una solución de fenol (contaminante) de 50 mg/L a vasos de precipitación, graduaron el pH, agitaron durante 30 min, agregaron 600 µL de H₂O₂ y muestrearon en diferentes intervalos de tiempo para determinar la concentración de fenol. Lograron la degradación completa del fenol en 40 min. Concluyeron que la investigación proporciona una nueva forma de obtener nanoláminas de CuO y que es eficiente para la degradación de fenol.

En el artículo de Navarro *et al.* (11) aplicaron el tratamiento basado en Fenton no electrolítico a una solución de desecho del cobreado real que contenía una mezcla de compuestos orgánicos que incluían ácido tartárico, formaldehído y ácido fórmico. Los iones de Cu(II) presentes de forma natural se usaron directamente como catalizador a cambio del Fe(II) al cual se agregó H₂O₂ para generar radicales hidroxilos. Evaluaron con ácido

tartárico el efecto del pH, en el rango de pH de 3 a 5 lograron eliminación cercana al 100 %, pero no hay influencia significativa del pH. Después de 30 min, la concentración de H₂O₂ se estabilizó a 10 mM desde el valor inicial de 400 mM. Experimentos paralelos con formaldehído a pH 3 y 4 usando la misma concentración de H₂O₂ (400 mM) y temperatura (25°C) revelaron su baja eficiencia de degradación, incluso después de 4 h, desapareció menos del 10 % de formaldehído. A la temperatura más alta y pH 3, la eliminación de formaldehído fue 98 % después de 2 h y 79 % a pH 4. Con Cu-Fenton, se logró una eliminación cercana al 99 % de COT y DQO.

En el estudio de Porras *et al.* (12) se evaluó el papel de los ácidos húmicos (HA) en la desinfección bacteriana en varios procesos basados en energía solar, también la presencia de metales (Fe y Cu) y sus implicaciones fotoquímicas. Evaluaron el uso del ácido húmico que contiene Fe y Cu extraído de residuos de carbón para mejorar los procesos de desinfección basados en luz solar (hv), hv/H₂O₂ y hv/H₂O₂/Fe²⁺. Usaron reactores de 100 mL esterilizados, colocaron las muestras en un agitador magnético (350 rpm) en un simulador solar e irradiaron con una lámpara NXe. En los experimentos de foto-Fenton, las concentraciones de las soluciones de Fe²⁺ y H₂O₂ correspondió, respectivamente, a valores de 1 y 20 mg/L, y el pH varió entre 6,5 a 7. La presencia de metales mejoró en gran medida la desinfección cuando se agregó H₂O₂ en el proceso foto-Fenton, y redujo los tiempos de inactivación (> 50 %) debido a vías de inactivación asistidas homogéneas basadas en Fenton (Fe) y tipo Fenton (Cu).

En la publicación de Zhang *et al.* (13) degradaron fenol por el proceso foto-Fenton heterogéneo con catalizadores de Fe/Cu/Al. Evaluaron el pH (2,5 - 6,5), temperatura de reacción (25 - 65°C), temperatura de calcinación (300 - 600°C), dosis de catalizadores (0 - 6,68 g/L) y concentración de H₂O₂ (300 - 2000 mg/L). Probaron el rendimiento catalítico de los catalizadores con 150 mL de solución de fenol de 50 mg/L bajo radiación UV, ajustaron el pH de la solución de fenol con solución de HCl (0,1 mol/L) y solución de NaOH (0,1 mol/L), agitaron la suspensión de fenol y catalizador durante 30 min y agregaron H₂O₂. La capacidad catalítica de los catalizadores podría alcanzar 88,0 % y 75,6 % a pH 4,5 y 5,5. La velocidad de eliminación

alcanzó el 95,4 % a 65°C en 20 minutos en las condiciones optimizadas. Los catalizadores lograron una eficiencia de degradación del 79 % en 3 h después de la cuarta reutilización consecutiva, presentando una buena estabilidad y reutilización.

En el artículo de Sharma *et al.* (14) utilizaron como fotocatalizador nanopartículas (NP) de CuO pristinas y NP de CuO dopadas con selenio (2, 5 y 10 % p/p de precursor de selenio) para mejorar la degradación del 4-bromofenol. En los experimentos, trataron 50 mL de una solución de 4-bromofenol (10 ppm) con luz ultravioleta (30 W, $\lambda = 365 \text{ nm}$) en agitación y añadieron H_2O_2 . Alcanzaron una degradación del 99,5 % del 4-bromofenol en 90 min a una velocidad de $0,057 \text{ min}^{-1}$. Demostraron la síntesis, caracterización y aplicación de NP de CuO dopadas con Se para la fotodegradación de 4-bromofenol. Por lo tanto, el mecanismo de degradación se analiza a la luz del mecanismo tipo foto-Fenton, que sin embargo es más común para los materiales basados en Fe.

En el estudio de Sun *et al.* (15) se evaluó la degradación de lo orgánico en materia de colorantes (naranja de metilo, azul de metilo y rodamina B) con catalizadores $\text{Cu}_2\text{O-Cu/C}$ tipo al proceso Fenton. Investigaron la influencia del pH inicial, temperatura de reacción (20, 30, 40, 50 y 60°C), dosis de catalizador y concentración de H_2O_2 en el rendimiento del catalizador. En un matraz de vidrio de 100 mL en agitación magnética, fijaron el pH e iniciaron la degradación al agregar el colorante, H_2O_2 y catalizador de cobre-carbono con especies de Cu^+ y Cu^0 soportadas en microesferas de carbono (CCM). En condiciones de reacción óptimas, observaron que el modelo cinético de Behnajady-Modirshahla-Ghanbery predice bien los datos experimentales. Degradaron el anaranjado de metilo (MO) al 100 % para las soluciones de MO con 20 mg/L y 50 mg/L, logrando la remoción de más del 95 % para la solución de MO con concentraciones superiores a 80 mg/L. Este estudio proporciona un enfoque sencillo y rentable para la preparación de catalizadores a base de óxido cuproso para la degradación catalítica de colorantes orgánicos similar a la de Fenton.

En el estudio de Lee *et al.* (16) realizaron la degradación oxidativa del diclofenaco (DCF) y carbamazepina (CBZ) por el sistema Fenton ($\text{Cu(II)/H}_2\text{O}_2$) y sistema foto-Fenton ($\text{UV/Cu(II)/H}_2\text{O}_2$). En matraces Pyrex

de 100 mL examinaron el pH, concentración de Cu(II) y captadores de radicales. Cu(II)/H₂O₂ como sistema, generó la degradación óptima de los contaminantes fue a pH próximo a 8 y atribuyeron a los efectos combinados de dos factores dependientes del pH: la reducción acelerada de Cu(II) por H₂O₂ al aumentar pH y cambio del oxidante principal del radical hidroxilo (\bullet OH) al ion cuprilo (Cu[III]) a valores altos de pH. La irradiación UV-A mejoró significativamente la degradación de los contaminantes objetivo en todo el rango de pH estudiado (pH 3 - 10) y cambió ligeramente las condiciones óptimas de pH a valores más bajos (pH 6 - 7). Las velocidades de degradación de CBZ fueron el 45 % y el 20 % en el sistema UV/H₂O₂ y UV/Cu(II)/H₂O₂ a pH 3 y 7 respectivamente. La degradación mejorada de los contaminantes derivado de UV/Cu(II)/H₂O₂ como sistema, parece resultar de la disminución acelerada de Cu(II) por los radicales hidroperoxilo/superóxido, que se producen a través de la fotólisis de H₂O₂.

En la publicación de Dong *et al.* (17) realizaron la destrucción aeróbica total de contaminantes azo con cobre de valencia cero a nanoescala a pH neutro. Sintetizaron cobre de valencia cero a nanoescala (nZVC) con un sencillo método solvotérmico y realizaron la eliminación aeróbica de contaminantes azoicos a pH neutro. Los colorantes que consideraron son: naranja de metilo (MO, 20 mg/L), rojo congo (CR, 20 mg/L), rodamina B (RhB, 5 mg/L), azul de metileno (MB, 10 mg/L) y pentaclorofenol sódico (NaPCP, 10 mg/L). Utilizaron vasos de precipitación de 200 mL en la oscuridad, agregaron 0,03 g de nZVC en 100 mL de solución contaminante objetivo y agitaron en la oscuridad con burbujeo de 1,5 L/min de aire. Los resultados de la medición de carbono orgánico total (COT) revelaron que alrededor del 56,1 % de MO y 59,6 % de CR se mineralizaron en 4 h. Por otra parte, el 93,0 % de RhB, 59,0 % de MB y 34 % de NaPCP podrían eliminarse aeróbicamente con nZVC en una semana. Este estudio puede profundizar nuestra comprensión sobre la degradación de contaminantes orgánicos con oxígeno molecular activado por metal de valencia cero, y también proporcionar un nuevo método para eliminar contaminantes azoicos a pH neutro.

En la investigación de Temel *et al.* (18) desarrollaron nuevos sistemas catalíticos para degradar derivados del clorofenol (CP), específicamente el 4-clorofenol, 2,4-diclorofenol y 2,4,6-triclorofenol, usaron TiO_2 o TiO_2 cargado con plata al 1 % (Ag-TiO_2). En los sistemas catalíticos homogéneos Fenton [$\text{Fe(II)}/\text{H}_2\text{O}_2$] y tipo Fenton [$\text{Cu(II)}/\text{H}_2\text{O}_2$ y $\text{V(IV)}/\text{H}_2\text{O}_2$] emplearon concentraciones de CP más altas (1×10^{-2} mol/L). Realizaron los experimentos en un reactor de vidrio discontinuo cilíndrico de 500 mL a reflujo, mezclaron 100 mL de solución madre de CP disueltos en agua destilada y la cantidad requerida de sal, ajustaron el pH a 2 y añadieron lentamente H_2O_2 . Para el método Fenton, obtuvieron eficiencias de degradación y eliminación para 4-CP (85,7 % por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS) y 83,3 % de eliminación de DQO) y 2,4-DCP (91,8 % de GC/MS y 80,8 % de eliminación de DQO). Para el método tipo Fenton que involucra iones de cobre [$\text{Cu(II)}/\text{H}_2\text{O}_2$], no observaron degradación para el 4-CP y obtuvieron una degradación baja (28,8 %) para el 2,4-DCP. Por el contrario, lograron una degradación alta para el 2,4,6-TCP (63,3 %), que fue mayor al Fenton. La eliminación de DQO es del 60%, lo que indica que se produce una mineralización completa del 2,4,6-TCP utilizando este método. Los resultados confirman que el sistema Fenton es el método de degradación más efectivo y que el contaminante se mineralizó con éxito. La oxidación homogénea con iones de vanadio no fue un sistema eficaz para degradar los derivados de CP. La degradación de cada CP es extremadamente alta en comparación con el TiO_2 puro, que requiere mucho más tiempo de exposición para obtener el mismo grado de degradación.

En el estudio de Pham *et al.* (19) estudiaron la cinética de reacciones de concentraciones nanomolares de Cu(I) y Cu(II) con H_2O_2 para determinar el mecanismo de las reacciones de Cu(II) y Cu(I) con H_2O_2 a pH circumneutral y si $\cdot\text{HO}$ es el intermediario oxidante activo. Las mediciones indicaron que la reacción entre Cu(I) y H_2O_2 no resultó en la producción de $\cdot\text{HO}$ pero involucró el hecho de formar un estado de oxidación superior del cobre, Cu(III) . El Cu(III) reacciona con los sustratos presentes a velocidades mucho más lentas en comparación con las del $\cdot\text{HO}$. La velocidad de formación de $\cdot\text{HO}$ a partir de la disociación de Cu(III) fue extremadamente lenta a pH 8,0, por lo que no es un oxidante importante

en este sistema. La rápida velocidad de reacción de Cu(III) con Cu(I) contribuye significativamente al ciclo redox del cobre y la capacidad oxidante asociada del sistema Cu(I)/Cu(II)/H₂O₂/O₂.

Hong *et al.* (20) desarrollaron esfuerzos por degradar la rodamina B (RhB) con el proceso UV/Cu²⁺/H₂O₂. Utilizaron un reactor cilíndrico de vidrio con una lámpara UV de 10 W, la solución de 500 mL consistió de 0,167 mmol/L de RhB y los iones de metales pesados deseados. Además, estudiaron las influencias de la concentración de Cu²⁺, métodos de adición de H₂O₂, pH y radiación UV en la degradación de RhB para el sistema UV/Cu²⁺/H₂O₂. Los resultados muestran que el sistema que investigaron degradó por completo en 30 min. También la degradación obedeció a la ecuación cinética de primer orden. Encontraron que las condiciones de reacción óptimas eran [H₂O₂] = 0,118 mmol/L, [Cu²⁺] = 0,324 mmol/L y formas de agregar H₂O₂ dos o más veces en lugar de una, pH = 3 y necesidad de radiación UV. Además, la coexistencia de Mn²⁺ con UV/Cu²⁺/H₂O₂ mejoró la eficiencia de degradación, por lo tanto, el sistema UV/Cu²⁺/Mn²⁺/H₂O₂ podría considerarse un método potencial para recuperar aguas con presencia de sustancias o elementos contaminantes.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la publicación de Salas (21) evaluaron lo eficiente del foto-Fenton como proceso en la degradación de colorantes de vertidos textiles de la ciudad de Arequipa. En la parte experimental utilizó el efluente de una empresa textil y realizó la filtración, acidificación (a un pH de 2 - 3 con H₂SO₄), oxidación y neutralización. Para la oxidación, utilizó un matraz de Erlenmeyer de 250 mL y agregó 200 mL del efluente, al cual agregó H₂O₂ y FeSO₄, luego utilizó el ozonificador para la agitación. Logró degradar el 94 % respecto al índice de color y redujo el 80 % de la DQO, 62 % de la DBO y 31 % de los SST. Concluyó que foto-Fenton tiende por ser una opción eficaz para degradar colorantes de vertidos textiles.

El artículo de García y Oré (22) evaluaron la degradación del azul de metileno con el proceso Fenton like homogéneo. La muestra fue artificial

considerando la composición del drenaje del Túnel Kingsmill del 2014 (ácido de mina), del cual recuperaron el hierro para ser usado como fotocatalizador en foto-Fenton como proceso. Lo inicial en concentración de la solución de azul de metileno fue 10 ppm y las variables que manipularon son: sulfato de hierro (III) (5 - 10 mL/L), dosis de H₂O₂ (6 - 12 mL/L), pH (3 - 5) y tiempo (10 - 20 min). Degradaron un porcentaje mayor al 95 % y demostraron que el pH no influye, además el H₂O₂ es el de mayor influencia seguido del FeSO₄ recobrado del drenaje ácido, ello aplicado en el objeto de estudio.

En la tesis de Riveros (23) aplicó el FeOCl como catalizador heterogéneo en el proceso Fenton, foto-Fenton y fotocatálisis en lo correspondiente a degradar el verde de bromocresol para lo cual usó un simulador solar (100 mW.cm²). El foto-Fenton, como proceso, y fotocatálisis el pH fue 3,6, utilizó 50 µL de H₂O₂, 30 mg de FeOCl y una concentración inicial del colorante de 40 ppm. En el Fenton, evaluó la cinética de degradación a diferentes pH y dosis de H₂O₂ (4,4; 6,6; 8,8 y 13,2 mM). El proceso de foto-Fenton presentó una mejor decoloración respecto a Fenton y fotocatálisis. Los mejores valores de pH fue 3,6 y de dosis de H₂O₂ entre 6,6 y 8,8 mM para el proceso Fenton; para el foto-Fenton fue 4,4 mM. Lo correspondiente a foto-Fenton degradó el 93 % en 15 min.

En la tesis de Revilla (24) se investigó el oxiclورو de hierro (FeOCl) como catalizador para el proceso Fenton y fotocatálisis para degradar el colorante Rodamina B. En el proceso Fenton estudiaron al pH (2; 3,6, 7 y 10), cantidad de H₂O₂ (30,8; 46,3; 61,7 y 92,5 mM) y al FeOCl sin dopar y dopado. En la fotocatálisis, la cantidad de catalizador fue 2,80 mM y lo inicial en términos de concentración del colorante fue 0,0115 mM. El foto-Fenton, como proceso, evidencia que la cantidad de catalizador fue el mismo, la concentración del H₂O₂ fue 12,3 mM y utilizó un simulador solar. El catalizador dopado con cerio y lantano presentó el mejor porcentaje de decoloración (mayor a 90 %) a un pH de 3,6 en 25 y 20 min, respectivamente, con una concentración de 92,5 mM de H₂O₂. En el proceso Fenton, la decoloración fue menor al 90 % en 180 min con 30,8 mM de H₂O₂. Los catalizadores dopados son los más eficientes que sin dopar.

En la investigación doctoral de Gutiérrez (25) se aplicó un proceso que combinó a lo electroquímico y fotoquímico para muestras sintéticas de la industria textil que contiene tres colorantes reactivos y un DQO inicial de 1458 mg/L. Utilizó tres reactores fotoquímicos de 1,5 L implementadas con lámparas UV y agitación. Como método se consideró a la técnica de superficie de respuesta en torno a lo experimental correspondiente al cribado definitivo que contempló niveles en tres secciones como optimizador. En el proceso Fenton evaluó la relación de reactivos Fenton $[H_2O_2]/[Fe^{2+}]$ (11,25, 18,75 y 26,25), potencia de lámpara (4, 11 y 18 W), pH (2, 3 y 4) y tiempo de reacción (60, 120 y 180 min). De los resultados, el tiempo de tratamiento y la relación de reactivos Fenton con 49,9 % y 37,9 % respectivamente, son las más significativas para el proceso Fenton. Concluyó que el método combinado redujo lo orgánico en 97,7 %, por lo cual consideró que es viable para recuperar aguas contaminadas.

Ríos y Orihuela (26) determinaron la cinética del colorante y la relación quelante: tiempo de tratamiento y Fe(III). Elaboraron una curva de calibración y para los experimentos utilizaron vasos de precipitación de 1 L al cual agregaron en agitación (1250 rpm) agua destilada, EDTA y Fe^{3+} (sin calentamiento presentó valores de 1.5:1 ó 2:1 respecto de la relación molar y con calentamiento 1:1 ó 1.5:1), colorante rojo directo (100 mg/L) y solución de H_2O_2 al 30 % (0.5 g/L). La relación quelante (en condiciones de calentamiento y ausencia de ello): Fe(III) fue 1.5:1, el tratamiento sin calentamiento correspondió a 90 y 100 minutos para la relación de 1.5:1 y 2:1, y presencia de ello por 160 min. Respecto a la decoloración, para la relación de 1.5:1 y 2:1 es 95.86 % y 83.99 % sin calentamiento, y con calentamiento es 85.97 % y 93.88 %, respectivamente.

En la investigación de Bernardo (27) se buscó solucionar la contaminación generada por los vertidos textiles del distrito de San Juan de Lurigancho con el proceso Fenton. Utilizó pruebas de jarras de 2 L, 1 L agua residual, la agitación fue 300 rpm y el tiempo de tratamiento fue 30 min. Experimentó con concentraciones de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso, y aplicó los mejores valores a los vertidos textiles. A la mejor dosis de H_2O_2 y Fe^{2+} de 0.92 mL de 400 mg respectivamente, obtuvo la reducción del 68,8 %, 99,97 %, 96,8 % y 82,5 % para los sólidos totales, conductividad eléctrica,

turbidez y DQO respectivamente. Concluyó que el proceso Fenton es viable para remover contaminantes de los vertidos textiles debido a que el efluente del tratamiento no superen los Valores Máximos Admisibles (VMA), por lo que puede descargarse al alcantarillado y no generar contaminación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Aguas residuales industriales

Las extensas actividades industriales y humanas que involucran productos químicos han liberado grandes cantidades de estos productos al medio ambiente, provocando considerables daños a los ecosistemas. Los contaminantes del agua son diversos y son una fuente trascendental del deterioro del ambiente. Estos contaminantes aumentarán y causarán un incremento significativo en las enfermedades transmitidas por el agua. Dada la situación actual, existe la necesidad de desarrollar procesos avanzados para el tratamiento de aguas residuales de bajo costo y altamente efectivas (28).

Diversos contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos ingresan al sistema de agua, causando la contaminación del agua. Estas sustancias son de gran preocupación toxicológica por su bioacumulación y no biodegradabilidad. Las fuentes principales son la minería, metalurgia, curtido, combustibles fósiles, industria química y otros. Los contaminantes orgánicos en el agua son cancerígenos y no biodegradables, y pueden permanecer en el ambiente en extensos periodos y causar efectos dañinos en los mamíferos y organismos acuáticos (29).

El proceso de teñido que usa metales y colorantes complejos puede descargar aguas residuales que contienen moléculas de colorante y varios metales pesados como Cu^{2+} , Mn^{2+} , Ag^+ , Pb^{2+} , Hg^{2+} , etc. Además, los laboratorios producen aguas residuales que contienen colorantes y metales pesados para el uso frecuente de colorantes, indicadores, reactivos cromogénicos, etc. Estas aguas residuales muestran una alta

toxicidad para los metales pesados y una biodegradabilidad refractaria para los compuestos orgánicos, y han generado una gran contaminación en el medio ambiente en el que vivimos, por lo tanto, cómo tratar este tipo de aguas residuales resulta ser un problema difícil. Como los iones metálicos tienen una gran solubilidad y no se pueden degradar ni evaporar, cómo hacer uso de los iones metálicos, mientras se degrada el colorante refractario, se convierte en una investigación muy significativa (20).

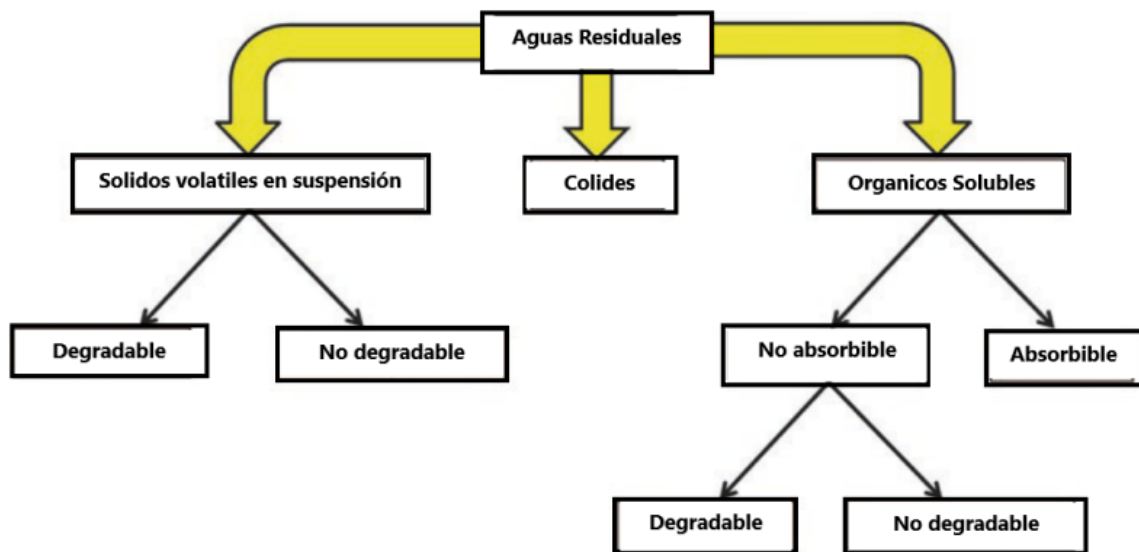


Figura 1. Componentes orgánicos de las aguas residuales.

Fuente: Pathania *et al.* (29 pág. 3).

a) Contaminación de aguas por la industria textil:

Originada por la incapacidad de las industrias textiles para disponer adecuadamente de sus aguas residuales es uno de los más grandes desafíos que afecta a todo el mundo. La industria textil es el principal contribuyente a la economía global y contaminación ambiental prácticamente en el mundo. Los efluentes con colorantes contaminan el ambiente y afecta a la salud del hombre, esta industria genera considerables cantidades de aguas residuales coloreadas con diversos contaminantes persistentes.

Los efluentes textiles contienen diversos colorantes tóxicos, metales pesados, como mercurio, cromo, plomo, cadmio y arsénico, que se requieren en la producción de pigmentos de color de colorantes textiles, también compuestos aromáticos. Estas sustancias tóxicas se transportan a distancias largas junto con los efluentes. En el agua y suelo permanecen mucho tiempo y representan un alto riesgo en términos de salubridad y reduce lo fértil del suelo, también la capacidad de fotosíntesis de la biomasa acuática, lo que resulta en el desarrollo de condiciones anóxicas para la fauna y la flora acuáticas. Los colorantes textiles afectan la estética de las aguas superficiales al incrementar la DBO y DQO, altera la fotosíntesis, impide el desarrollo vegetal, es parte de la cadena alimentaria, brinda aspectos de resistencia, acumulación biológica y favorece a generar mutaciones, cánceres y contextos de toxicidad. Los grandes volúmenes de agua que se usan en la fabricación de telas producen prácticamente lo mismo al favorecer con niveles altos de sólidos disueltos, sustancias orgánicas, metales, sales y colorantes recalcitrantes. Presentan cualidades de alta solubilidad y persistencia de colorantes sintéticos en el cuerpo receptor hídrico. Las opciones de tratamiento convencionales suelen ser ineficaces, así como la polución secundaria y la eliminación ineficaz de la carga orgánica tras la decoloración requieren el uso de enfoques avanzados, por lo tanto, es necesario con urgencia investigar contextos de remoción efectiva de contaminantes que sean rentables y amigables con el ambiente, principalmente para aspectos ambientales con características de peligrosidad como lo derivado de las actividades textiles (30).

Las aguas residuales textiles (ART) contienen diversos colorantes y adiciones químicas que hacen que el desafío ambiental para la industria textil no solo sea un desecho líquido sino también en su composición química. La principal contaminación en estas aguas residuales es del teñido y acabado, quienes requieren diversos insumos químicos y colorantes, que generalmente son sustancias orgánicas de estructura compleja. Debido a una parte de ellos forman parte del producto final, se convirtieron en desechos y causaron problemas de eliminación. Los fundamentales contaminantes son los

altos niveles de sólidos en suspensión, DQO, calor, color, acidez y otras sustancias solubles. La decoloración de los efluentes textiles y de lo industrial generador de colorantes es una preocupación ambiental importante. Además, sólo el 47 % del 87 % de los colorantes son biodegradables (31).

Se presentan a continuación (tabla 2) los principales parámetros de los vertidos de la industria textil con intervalos de valores, lo cual evidencia el grado de contaminación que representan estos efluentes.

Tabla 2. *Características de las aguas residuales de la industria textil compuesta.*

Parámetros	Valores
pH	7,0 - 9,0
Demanda bioquímica de oxígeno	80 - 6000 mg/L
Demanda química de oxígeno	150 - 12000 mg/L
Sólidos suspendidos totales	15 - 8000 mg/L
Sólidos disueltos totales	2900 - 3100 mg/L
Cloruro	1000 - 1600 mg/L
Nitrógeno Kjeldahl total	70 - 80 mg/L
Color (Pt-Co)	50 - 2500 mg/L

Fuente: Al-Kdasi *et al.* (31).

En la figura 2 se presentan los impactos ecotoxicológicos en el aire por las descargas de óxidos de nitrógeno y azufre y otros. También se describe los diversos impactos negativos en las plantas, animales acuáticos, agua, microorganismos acuáticos y humanos y animales generados por los vertidos textiles que contienen plásticos y fibras, además de colorantes. Como consecuencia se altera el ecosistema perturbando el nivel trópico de la cadena alimentaria y alternado el equilibrio ecológico. Con la figura se evidencia el alto impacto negativo al ecosistema que produce la descarga de contaminantes de la industria textil.

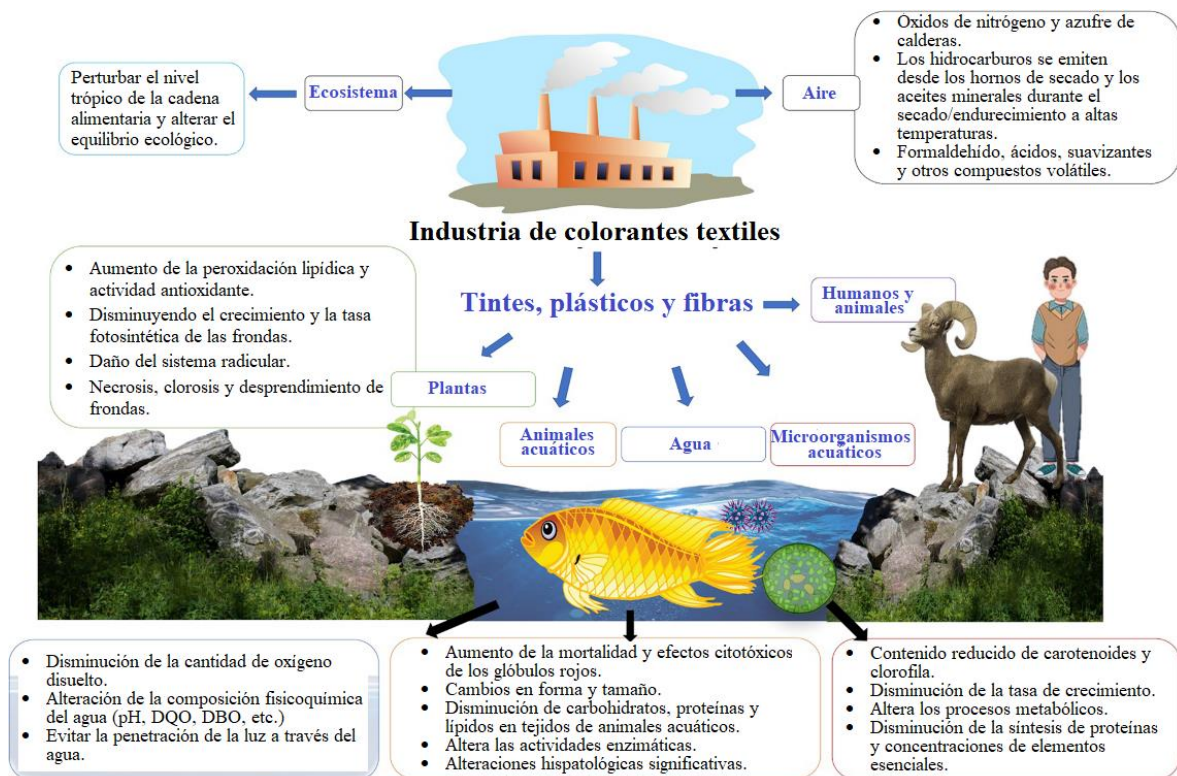


Figura 2. Impactos ecotoxicológicos de las aguas residuales textiles que contienen colorantes en el medio ambiente y los microorganismos vivos.

Fuente: Al-Tohamy (30).

2.2.2. Procesos para el tratamiento de aguas residuales textiles

Acceder a agua de consumo, considerada limpia y potable, es uno de los mayores problemas globales que afectan al hombre hoy en día debido a las actividades antropogénicas y al acceso inseguro. Por ello, la causa de degradar contaminantes orgánicos como microorganismos y colorantes textiles son cada vez más populares en todo el mundo y cada vez es más popular en el mundo con la finalidad de suministrar agua potable de calidad. Lamentablemente, en la mayor parte de los países de bajos y medianos ingresos, los recursos que se requieren para tratar el agua son caros y ese detalle hace que no sean viables. Más de 10000 colorantes y pigmentos sintéticos diferentes son muy usados en la industria textil y papelera, lo que representa un impacto negativo significativo al ambiente y salud del hombre. Los materiales celulósicos (algodón, rayón y lino de origen vegetal), los materiales proteicos como la seda, lana y mohair, así

como los materiales sintéticos como el nailon, acrílico y poliéster se pueden producir en la industria textil tanto por métodos húmedos como secos. Es la etapa final del proceso de teñido de textiles donde se elimina el exceso de colorante y se libera pigmentos al agua, lo que aumenta la contaminación del agua. Además, los colorantes textiles a base de agua se caracterizan por persistir en el ambiente y en aguas subterráneas durante extensos períodos de tiempo. Por lo tanto, el desarrollo de procesos sostenibles es fundamental para mejorar las tecnologías de eliminación de color (30).

En secuencia a ello, se presentan las diferentes tecnologías de tratamiento de vertidos textiles y son:

a) Procesos físicos para el tratamiento de aguas residuales textiles:

Considerando el mecanismo de transferencia de masa, se han utilizado varios métodos físicos como la adsorción, filtración por membrana e intercambio iónico para tratar las ART con colorantes con un porcentaje de eficiencia de separación del 85 % al 99 %. Los métodos físicos tienen muchas ventajas, incluida la construcción simple, operación fácil, bajo costo, insumos químicos más bajos y ausencia de sustancias tóxicas, sin embargo, estos métodos generalmente no son los preferidos debido a varios inconvenientes, incluida la formación de subproductos y lodos tóxicos, y su aplicabilidad limitada. Además, la alta temperatura, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), pH, color, metales pesados y otros factores también suelen dificultar su uso en el tratamiento de ART (30).

b) Procesos químicos para el tratamiento de aguas residuales textiles:

Los métodos químicos como coagulación-floculación, procesos electroquímicos y los POA se usan para el tratamiento de ART. Con la excepción de los métodos electroquímicos, estos métodos son generalmente más caros que los procesos físicos y biológicos.

Asimismo, las desventajas primordiales del uso de los métodos químicos para eliminar los colorantes de las ART son la alta potencia, uso de grandes cantidades de insumos químicos y requerimiento de equipos adecuados. El uso de métodos químicos crea problemas adicionales, ya que se forman metabolitos y subproductos tóxicos durante el procesamiento (30).

c) Procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales textiles:

Estos métodos son más optimistas que los métodos físicos y químicos porque no son difíciles de usar, producen menos sedimentos, requieren menos insumos químicos, son más baratos y tienen propiedades de ahorro de energía, son más seguros para el ambiente y los productos resultantes de las actividades metabólicas de los microorganismos no son tóxicos. Asimismo, los métodos biológicos son rentables para ser utilizado en los países en desarrollo y conducen a la mineralización total de los colorantes. La finalidad del tratamiento biológico es generar productos no tóxicos a partir de los colorantes orgánicos refractarios. El principal mérito de este tratamiento es usar microorganismos con alta biodegradabilidad en el tratamiento en efluentes con colorantes, individualmente o en combinación. La adsorción y la degradación son los dos principales procesos de tratamiento de colorantes en vertidos textiles. Estos procesos se llevan a cabo en condiciones aeróbicas o anaeróbicas, ya que los productos del procesamiento aeróbico son biomasa, CO_2 y H_2O , mientras que los principales productos del procesamiento anaeróbico son el metano. Los microorganismos y protistas, así como las levaduras y los sistemas basados en enzimas, son candidatos biológicos que representan viabilidad para recuperar vertidos residuales que presenten colorantes derivados de textiles, todo ello para convertir moléculas de colorante en productos no tóxicos (30).

2.2.3. Procesos de oxidación avanzada

Los mecanismos tratantes de oxidación convencionales han encontrado dificultades para oxidar colorantes y estructuras complejas de compuestos orgánicos a baja concentración o si son especialmente refractarios a los oxidantes. Para aliviar los problemas mencionados, se han desarrollado procesos de oxidación avanzada (POA) para generar radicales libres de hidroxilo mediante diferentes técnicas. Los procesos POA son una combinación de ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e irradiación UV, que mostraron la mayor promesa para tratar las aguas residuales textiles. Estos oxidantes decoloraron de manera efectiva los colorantes, sin embargo, no eliminaron completamente la DQO (31).

Se han utilizado varias tecnologías para la eliminación de colorantes e incluyen ósmosis inversa, coagulación-floculación, electrocoagulación, tratamiento biológico, intercambio iónico y oxidación avanzada, adsorción en carbón activado, y biosorción usando materiales naturales (32).

Los POA son tratamientos oxidativos que se utilizan para tratar aguas residuales con contaminantes tóxicos de industrias, centros de salud y PTAR. Los POA son diversos entre los cuales tenemos a procesos o sistemas UV/ O_3 , UV/ H_2O_2 , Fenton, foto-Fenton, sonolisis, fotocátalisis, radiólisis, procesos de oxidación en agua supercrítica y otros (33).

Los POA podrían ser una solución adecuada para eliminar o degradar los compuestos refractarios de las aguas residuales, ya que los radicales hidroxilo pueden promover la mineralización. Entre otros, la ozonización, proceso de Fenton, fotocátalisis, oxidación electroquímica, coagulación electroquímica y H_2O_2 /UV. Estos procesos, además de la producción de radicales hidroxilo, también pueden utilizar ozono y peróxido de hidrógeno, así como otros compuestos reactivos que pueden ayudar en la conversión del compuesto refractario (34).

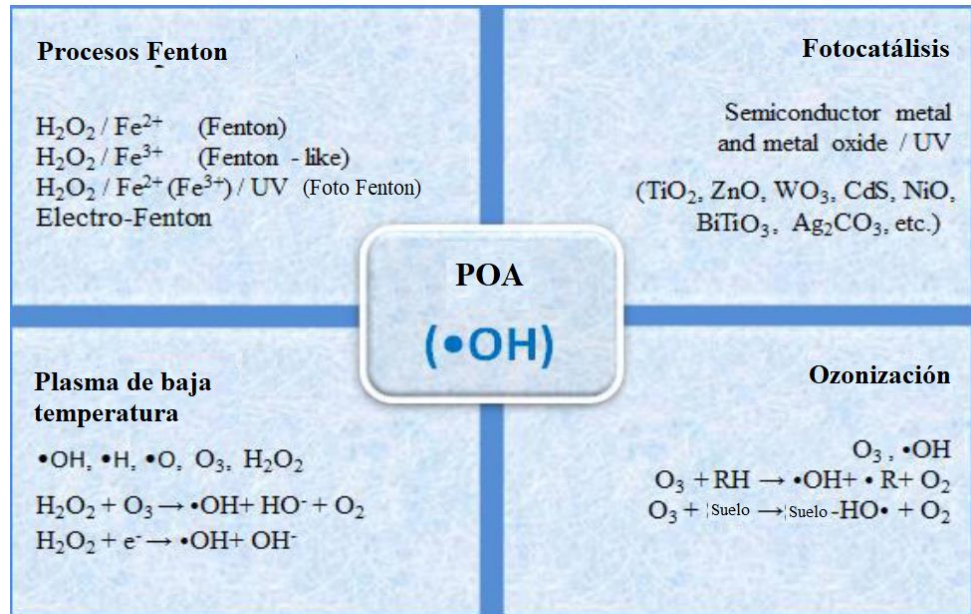


Figura 3. Tipos de procesos de oxidación avanzada.

Fuente: Cheng *et al.* (35).

El objetivo de cualquier diseño de POA es producir y utilizar radicales hidroxilo (•OH) libres que oxidan compuestos y lo destruyen, estos compuesto no pueden oxidarse con oxidantes convencionales. La tabla 3 muestra los potenciales de oxidación relativos de varios oxidantes químicos. Los POA se distinguen por la generación de radicales •OH y por ser selectivos, que es una cualidad de un oxidante. La versatilidad de los POA es que la producción de radicales •OH son de diferentes mecanismos o reacciones químicas. La producción de •OH se acelera mediante la combinación de O₃, H₂O₂, TiO₂, radiación UV, radiación con haz de electrones y ultrasonido. De estos, los procesos o sistemas O₃/H₂O₂, O₃/UV y H₂O₂/UV son los más prometedores para oxidar las aguas residuales textiles.

Tabla 3. *Procesos de oxidación avanzada.*

POA
H ₂ O ₂ /UV/Fe ²⁺ (Fenton fotoasistido)
H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ (Fenton)
Ozono/UV (también aplicable en la fase gaseosa)
Ozono/ H ₂ O ₂
Ozono/UV/H ₂ O ₂
Ozono/TiO ₂ /Irradiación con haz de electrones
Ozono/TiO ₂ /H ₂ O ₂
Ozono+irradiación con haz de electrones
Ozono/ultrasonidos
H ₂ O ₂ /UV

Fuente: Al-Kdasi *et al.* (31).

La evolución de la toxicidad de las aguas residuales durante los POA es compleja y aún no está clara, y la remoción de orgánicos considerados como tóxicos de los efluentes se está transformando en un tema cada vez más trascendental que ha recibido una atención cada vez mayor debido a su riesgo potencial para el medio ambiente ecológico y ser humano. Los POA se han empleado ampliamente como tratamiento avanzado para garantizar la calidad del efluente. Las especies reactivas producidas mediante la activación de oxidantes (peróxido de hidrógeno, persulfato, oxígeno) en los POA determinan la eliminación de los contaminantes orgánicos. En general, las especies reactivas incluyen radicales hidroxilo, radicales sulfato, radicales superóxido, electrón hidratado, ozono, etc., además, las especies reactivas unidas a la superficie y transferencia de electrones entre los contaminantes orgánicos y los oxidantes también podrían contribuir a la degradación de agentes de carácter orgánico en presencia de catalizadores heterogéneos.

La remoción de aquellos agentes, incluidos los tóxicos, es el principal objetivo del tratamiento de los POA, sin embargo, la desaparición de los contaminantes orgánicos tóxicos no significa su completa mineralización, así como la desaparición de la toxicidad. Durante el tratamiento con los POA, los contaminantes orgánicos pueden convertirse en productos intermedios. En base a sus propiedades fisicoquímicas, los productos intermedios de degradación pueden presentar una toxicidad menor, igual

o incluso mayor que los contaminantes originales. Si los productos intermedios de degradación no se mineralizaran más, las aguas residuales tratadas podrían presentar una toxicidad igual o mayor que las aguas residuales en las que no se aplicó ningún tratamiento. En este caso, los procesos de tratamiento de vertidos no juegan un papel completo considerando la eliminación de la toxicidad de las aguas residuales. Por lo tanto, los cambios de toxicidad durante los POA son fundamentales para evaluar con precisión el rendimiento de los POA.

Además, diferentes mecanismos podrían estar involucrados en la eliminación de los contaminantes orgánicos tóxicos en función de la propiedad de las especies reactivas, lo que podría resultar en la formación de diferentes productos intermedios de degradación y, en consecuencia, causar diferentes cambios de toxicidad indicando que la toxicidad de las aguas residuales podría cambiar con los tipos de POA (36).

2.2.4. Proceso Fenton

La oxidación de Fenton es un POA de uso común aplicado principalmente para la eliminación de compuestos orgánicos de efluentes líquidos. Este es un método rentable, fácil de aplicar y efectivo que mejora la biodegradabilidad y reduce la toxicidad de los efluentes biorrefractarios, como las aguas residuales agroindustriales.

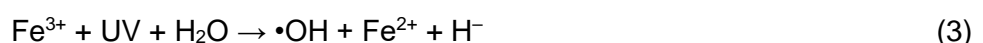
El mecanismo de oxidación de la reacción Fenton radica en la generación de radicales hidroxilo en un pH ácido (alrededor de 3), ello porque el peróxido de hidrógeno tiende por descomponerse debido a la acción de un catalizador rico en hierro. Este catalizador puede ser homogéneo o heterogéneo dependiendo de su estado en el medio reaccional. Esto puede representar un impacto significativo en el rendimiento del proceso de Fenton sobre la degradación de la materia orgánica en las aguas residuales reales.

El radical hidroxilo reactivo reacciona de forma no selectiva con sustancias orgánicas, que se basan en cadenas o anillos de carbono y contienen hidrógeno, oxígeno, nitrógeno u otros elementos.

El proceso de Fenton está bien descrito en la literatura, pero la mayoría de los artículos informaron sobre el uso de aguas residuales sintéticas. Sin embargo, las aguas residuales industriales son de matrices complejas, lo que puede contribuir a una disminución de la eficiencia del proceso. Según estudios previos con efluentes reales, el proceso homogéneo de Fenton parece mejor que el proceso heterogéneo. Esto puede indicar que el paso limitante es la reacción química en lugar de la transferencia de masa por difusión en los sitios activos del catalizador, sin embargo, la presencia de especies inhibitorias puede controlarse en los efluentes sintéticos, mientras que algunas fracciones secuestradoras de radicales seguramente son evidentes en vertidos residuales reales. Esta reducción de la eficiencia puede estar relacionada con la adsorción de agentes inhibidores sobre la superficie del catalizador, como materia orgánica, metales pesados, que bloquearán los sitios activos.

La eficiencia del proceso Fenton es función de pH, temperatura, presión y concentración de reactivos. Un factor crítico es el pH porque requiere un medio ácido (2,8 - 3,0) para maximizar la actividad catalítica del Fe^{2+} . El incremento de la temperatura acelera la cinética de la reacción; a niveles relativamente altos el H_2O_2 se descompone, por lo que comúnmente la temperatura y presión ambiental se usan. Este proceso se ha utilizado eficientemente para degradar colorantes (37).

El Fenton y foto-Fenton son POA más usados para remover agentes orgánicos recalcitrantes (colorantes y otros) presentes en vertidos residuales y se fundamenta en la mezcla del reactivo de Fenton (H_2O_2) y sal de hierro (II) soluble. La formación de $\bullet\text{OH}$ es la primera etapa en el método de Fenton (Ec. 1), y ocurre en el proceso foto-Fenton, como se observa a continuación (Ec. 2 y Ec. 3).



El mecanismo Fenton gráficamente se presenta en la siguiente figura.

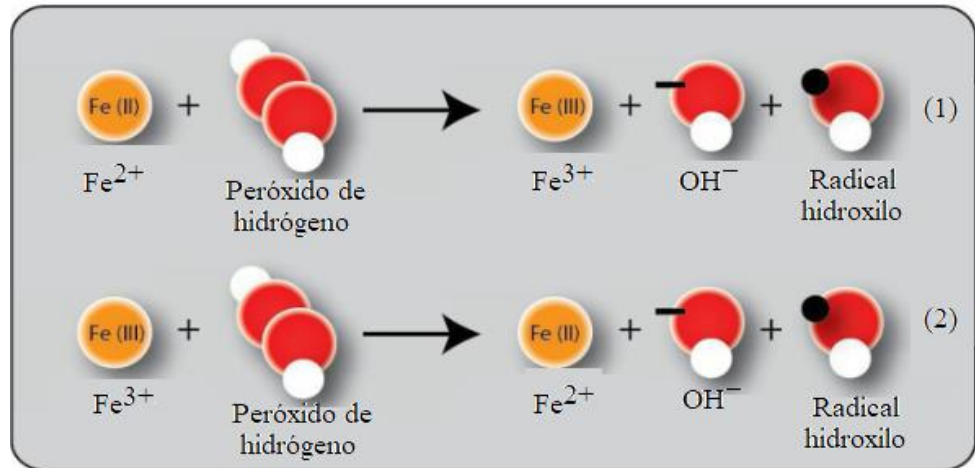


Figura 4. Mecanismo Fenton.

Fuente: O'dowd y Pillai (38).

2.2.5. Proceso foto-Fenton

En el proceso foto-Fenton la eliminación de los compuestos orgánicos se acelera por la irradiación UV mediante los 3 mecanismos principales: (i) foto-reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} (Ec. (4)) que promueve la regeneración del catalizador; (ii) fotólisis directa de H_2O_2 a $\bullet\text{OH}$ (Ec. (5)), por esta reacción hay generación de $\bullet\text{OH}$ más lenta y contribuye a una baja velocidad de degradación; (iii) foto-descarboxilación de carboxilatos férricos, dependiendo de la transferencia de carga de ligando a metal en los complejos formados entre Fe^{3+} y el resto de ácido carboxílico (Ec. (6) y (7)) (39).



Las ventajas del proceso foto-Fenton son: mayor velocidad de degradación, requiere menor cantidad de hierro catalítico y produce menos lodos. Los retos de este proceso se asocian con la dificultad del diseño, la inversión por los reactores, lo corto del ciclo de vida de lo artificial, el alto consumo de energía y la limitada aplicación de la radiación solar por su intermitencia (39).

El proceso foto-Fenton $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV-vis}$ es una mejora o aumento de la reacción de Fenton que utiliza la “región de luz entre el UV cercano y el visible”, como se muestra en la figura 5, hasta una longitud de onda de 600 nm para mejorar la producción de radicales hidroxilo (Ec. (8)) y para reducir rápidamente Fe^{3+} de vuelta a Fe^{2+} como se ve en la Ec. (9) y la Ec. (10). Esta conversión da como resultado que no sea necesario agregar hierro adicional al proceso ya que el hierro se reduce constantemente, lo que resulta en cantidades más bajas de hierro requeridas para foto-Fenton que para Fenton. La reducción de Fe^{3+} también crea otro radical hidroxilo que da como resultado que el peróxido de hidrógeno se convierta completamente en dos radicales. Se pueden usar tanto la luz UV como la solar, pero una longitud de onda inferior a 310 nm ayudará con la producción de radicales que se ven en la Ec. (8) convertir peróxido de hidrógeno en $\cdot\text{HO}$.

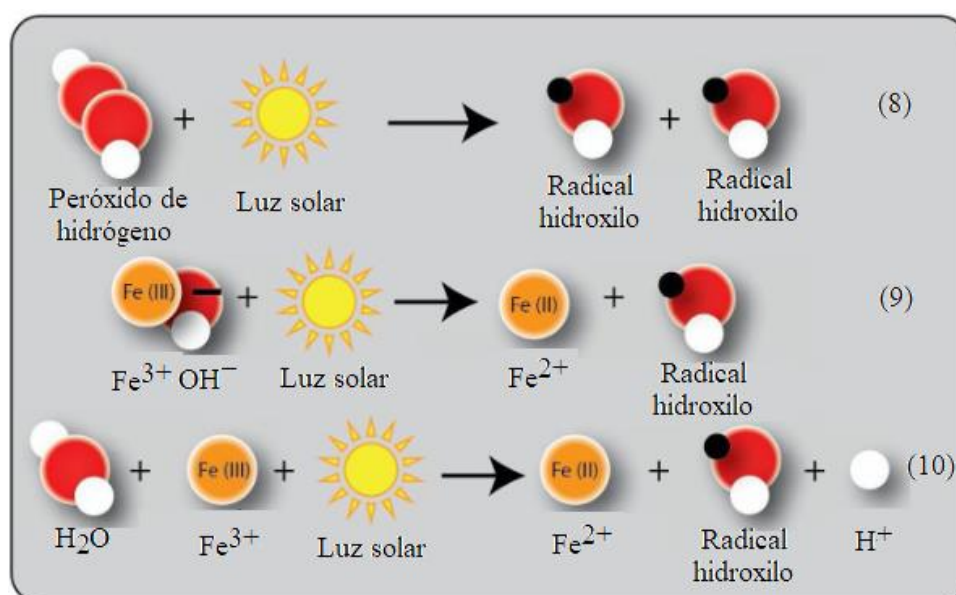


Figura 5. Mecanismo foto-Fenton.

Fuente: O'dowd y Pillai (38).

El Fenton oscuro tradicional, en comparación con el foto-Fenton, es aproximadamente 40 veces más lento, el foto-Fenton también muestra un mayor éxito en sistemas similares a Fenton en comparación con UV/H₂O₂ y UV/TiO₂, y se observa que foto-Fenton tiene una cinética más alta.

El foto-Fenton ha tenido un uso generalizado en la eliminación de compuestos orgánicos del agua en los años posteriores a su descubrimiento, descomposición de tintes, eliminación de productos petroquímicos, eliminación de productos farmacéuticos, recuperación de aguas tras su tratamiento y para la degradación de CEC. Últimamente se ha comenzado a utilizar para la desinfección del agua o la eliminación de microorganismos (38).

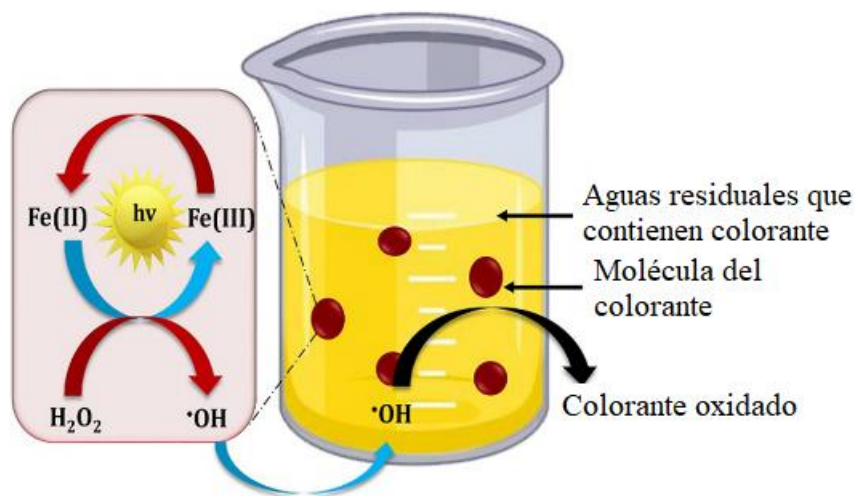


Figura 60. Proceso foto-Fenton.
Fuente: Al-Tohamy *et al.* (30).

2.2.6. Proceso tipo foto-Fenton

El proceso tipo o similar a foto-Fenton es un proceso donde el catalizador son iones como Cu^{2+} , Mn^{2+} y Co^{2+} , pero no el Fe^{2+} , y puede utilizar como fuente de energía la radiación solar.

En la siguiente figura se presentan los mecanismos que generan radicales hidroxilo en el proceso Fenton y tipo Fenton. Una diferencia es entre las opciones de generación de H_2O_2 , en el mismo tratamiento o agregando el reactivo. Otras opciones involucran el uso de diferentes catalizadores u otros procesos.

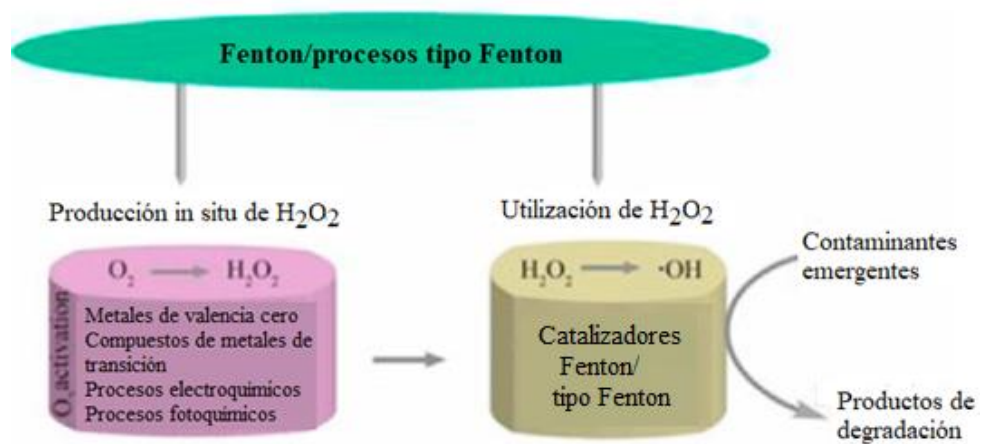


Figura 7. Mecanismo de generación de radicales hidroxilo por el proceso Fenton y tipo Fenton.

Fuente: Yi *et al.* (40).

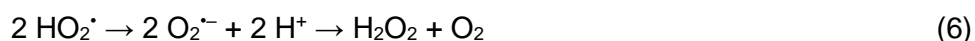
El Fenton convencional utiliza el ion Fe^{2+} para la generación de radicales hidroxilos; pero a pH mayores de 4 (recomendable entre 2 y 4) producen lodos y recuperar el catalizador es difícil, frente a ellos puede utilizarse iones de baja valencia como por ejemplo Cu^{2+} , Mn^{2+} y Co^{2+} que superan los inconvenientes producidos por intervalo del pH necesario (41).

Los sistemas Fenton basados en Cu han sido reconocidos como un conjunto prometedor de tecnologías para tratar vertidos industriales debido a su alta capacidad de oxidación catalítica. Se ha logrado un rápido progreso con respecto a los sistemas Cu Fenton no solo en los aspectos mecánicos fundamentales de estos sistemas, sino también con respecto a las aplicaciones durante la última década (42).

La reacción de foto/Fenton con catalizador de Fe disuelto mostró un buen efecto en lo orgánico. Los iones de metales de transición, pertenecientes a iones metálicos de órbita 3d como Cu^{2+} , Mn^{2+} , etc., tienen propiedades químicas similares a las del Fe^{2+} , que podían reaccionar con H_2O_2 para formar $\cdot\text{OH}$ ($E_0=2,8$ eV) y degradar colorantes. Si esos metales pesados activos pueden utilizarse racionalmente con H_2O_2 para descomponer sustancias orgánicas, tendrá un efecto positivo en la reducción de la contaminación y la reutilización de desechos (20).

El proceso Fenton, como uno de los POA, es utilizado largamente para recuperar aguas tras su tratamiento, pero el proceso clásico homogéneo de Fenton presenta dos inconvenientes distintos: (1) las condiciones de operación están limitadas a pH 2-3 y (2) se genera lodo de hierro durante la reacción, lo que provoca una contaminación secundaria. Se han dedicado esfuerzos continuos a resolver los problemas anteriores y explorar los materiales metálicos alternativos como nanocatalizadores tipo Fenton heterogéneos basados en (hidróxido) de hierro. Por otra parte, los catalizadores tipo Fenton basados en cobre han sido ampliamente investigados debido a su capacidad con H_2O_2 y generar radicales hidroxilo. Similar a las propiedades redox del hierro, tanto Cu^+ como Cu^{2+} pueden reaccionar con H_2O_2 , sin embargo, es más fácil convertir el cobre de un estado de valencia alto a uno bajo en comparación con el hierro (10).

Además del Fe, otros metales de transición como el Cu también son capaces de iniciar reacciones similares a las de Fenton. El Fenton con cobre se basa en la generación de especies de hidroxilo a través del siguiente mecanismo (11):



El cobre también puede convertir H_2O_2 en oxidantes reactivos a través de reacciones similares a las de Fenton. Aunque el cobre tiene una actividad catalítica más baja que el hierro en condiciones de pH ácido, muestra una mayor actividad en condiciones de pH alcalino y circumneutral, principalmente debido a la mayor solubilidad del ion cobre. Similar al sistema catalizado por hierro, se ha propuesto que el sistema $Cu(II)/H_2O_2$ produce ion cúprico ($Cu[III]$) como oxidante principal en lugar de $\cdot OH$ en condiciones de pH neutro. Se cree que el $Cu(III)$ es un oxidante más selectivo que el $\cdot OH$, pero no se conoce bien la reactividad de esta especie con los compuestos. Varios estudios demostraron la oxidación de lo orgánico mediante los sistemas tipo Fenton catalizados con Cu empleando distintos catalizadores considerandos como heterogéneos y homogéneos (16).

2.2.7. Colorantes

Los colorantes se utilizan en numerosas industrias, como la textil, alimentaria, plástica, imprenta, del cuero, cosmética y farmacéutica, que producen una considerable cantidad de vertidos residuales con colorantes. Si los colorantes son evidentes en los efluentes son una gran amenaza para el ecosistema, ya que la mayoría de ellos son tóxicos y mutagénicos, por lo tanto, es importante desarrollar una tecnología eficiente y respetuosa con el medio ambiente para el tratamiento de las aguas contaminadas con colorantes (15).

Los colorantes frecuentemente se clasifican en diversas categorías por su origen, estructura y aplicación. Del grupo de colorantes sintéticos, los colorantes azoicos, directos, reactivos, mordientes, ácidos, básicos, dispersos y sulfurosos son bastantes usados por la industria textil (figura 8). Las fibras naturales y sintéticas como lana, algodón, seda, poliéster, poliamida y acrílico se usan en la industria textil. Además, la industria textil usa varios insumos químicos muy tóxicos en varias etapas del proceso, como agentes de encolado, suavizado, desencolado, abrillantado y acabado, empero, los colorantes textiles no se adhieren fuertemente a las telas y forman parte de vertidos residuales que son derivados a los ambientes acuáticos (lagos, ríos y otros) sin ningún tratamiento, por lo cual representa una amenaza ecotoxicológicas para los organismos vivos (30).

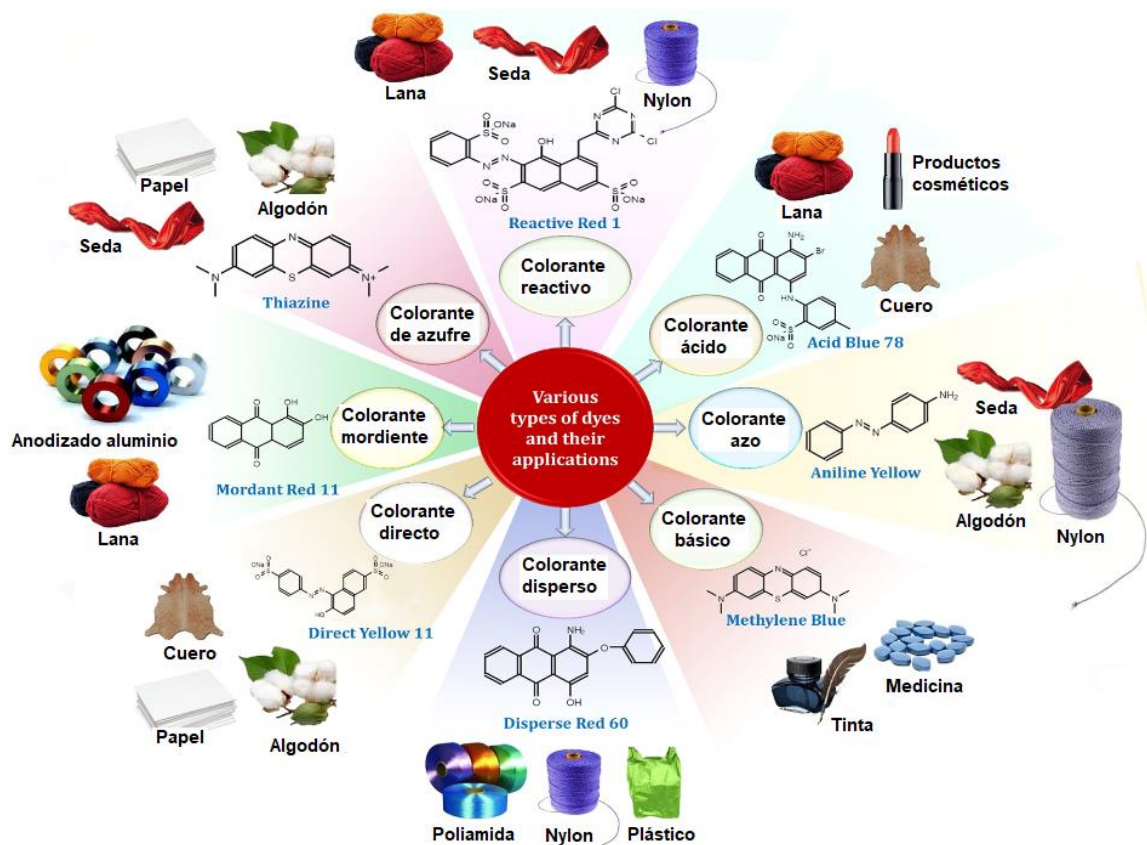


Figura 8. Diversas categorías de colorantes y sus posibles aplicaciones industriales.

Fuente: Al-Tohamy *et al.* (30).

a) Clasificación de los colorantes:

La clasificación de los colorantes se puede hacer según su constitución química (colorantes azoicos, antraquinona, índigo, xantenos, ftalocianinas, nitratos y nitrosos) o según sus cargas iónicas (colorantes ácidos, básicos, tina, directos y mordientes). Los colorantes se utilizan ampliamente en la industria textil por su estabilidad química, facilidad de síntesis y variedad de colores (32).

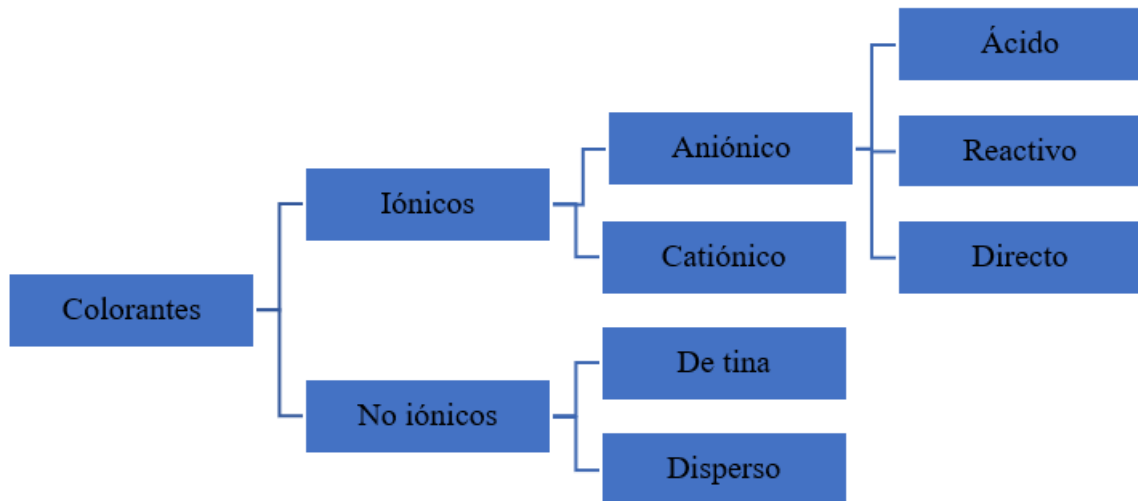


Figura 9. Clasificación de los colorantes según cargas iónicas.

Fuente: Osagie *et al.* (32).

Lo más común en torno a su clasificación, se da en función a la fuente del colorante considerando la naturaleza de lo cromóforo (37).

- Colorantes naturales y sintéticos:

Considerando el criterio del origen, son colorantes son naturales o sintéticos.

Los colorantes naturales se producen de recursos del ecosistema (vegetal, animal, mineral). Diversas plantas y animales tienen características potenciales para ser usados como colorantes naturales, y se han utilizado para el tinte natural desde hace mucho tiempo. Lo vegetal (raíz, tallo, corteza, hojas, frutos y semillas) llegar a contener diversos agentes colorantes que pueden ser extraídos. También estos colorantes pueden obtenerse de algunos insectos y minerales.

Fundamentalmente, son tres colores básicos que sostienen la generación de cualquier otra tonalidad, siendo crítico para los colorantes sintéticos a diferencia de los naturales limitados en sus mezclas para lograr el color anhelado, se usan varias formas de tinte empleando diversos colorantes para lograr los colores o tonalidades deseados.

Actualmente, por las ventajas de los colorantes sintéticos (de fácil aplicación y adquisición), casi todos los colorantes son de este tipo en el mercado y son una de las áreas de mayor producción a escala industrial (37).

- Colorantes según el grupo cromóforo:

Los colorantes en función al grupo de cromóforo generan subclases y son colorantes nitroso y nitro, azoico, antraquinonoide, indigoide, ftalocianina y azufre.

- Colorantes nitro y nitroso, representan una reducida fracción de la oferta de colorantes y por lo cual comercialmente son de poca importancia. Son de simples estructuras químicas con moléculas aromáticas pequeñas que tienen un grupo nitro y uno o más grupos amino o hidroxilo. Los colorantes ácidos son los primeros de esta subclase y principalmente se usan para el teñido de fibras animales naturales (lana y seda) (37).
- Colorantes azoicos, representan más del 60% de los colorantes que usan en la industria textil y presentan un fuerte teñido. Está disponible en toda la variedad de colores y se caracterizan por su producción rentable, buena solidez, preparación a partir de materias primas baratas y ampliamente disponibles. Estos colorantes azoicos al menos pueden contener un doble enlace nitrógeno-nitrógeno ($N=N$), no obstante, sus estructuras pueden ser muy distintas, presentan uno o más cromóforos azoicos y enlaces entre dos o más anillos aromáticos. Presentan estabilidad a la luz, así como resistencia a la degradación por acción de microorganismos microbiana (tratamiento convencional) y decoloración por el lavado (37).
- Colorantes antraquinonoides, se utilizan desde hace siglos y son los más comunes después de los colorantes azoicos. Presentan buena solidez debido a sus estables estructuras antraquinonoides. Las otras ventajas son el brillo y alta

solidez; es posible encontrar antraquinonas en bacterias, hongos, líquenes y plantas, lo que no sucede con los colorantes azoicos. Por sus características se usan bastante en la impresión y teñido de textiles (37).

- Colorante índigo, son los colorantes orgánicos más antiguos que se usan para el teñido natural durante 5000 años aproximadamente, siendo un único compuesto orgánico de color azul. El colorante índigo derivaba de las hojas de ciertas plantas, pero el colorante que se encuentra en grandes cantidades en el mercado es de origen sintético. Por sus características del índigo natural, el teñido requiere un alto conocimiento y experiencia para lograr la coloración y tono deseado (37).
- Colorantes de ftalocianina, de forma similar a pigmentos naturales, presentan tonos azules más brillantes y económicos en celulósicos, los cuales resisten bien a los ácidos, bases, oxidantes y reductores. Estos colorantes son muy estables, brillantes y tintóreamente fuertes (37).
- Colorantes de azufre, son los más comunes que se usan para el teñido con fines de alcanzar una tonalidad de negro intenso por sus fibras (celulosa), además alcanzan a producir tonos terciarios de bajo costo. No son solubles en medios hídricos y llegan a reducirse a la forma leuco soluble en agua para aplicar al sustrato con una solución de Na_2SO_3 y después se forman por oxidación química o atmosférica en los poros de la fibra. Son sustancias orgánicas complejas producidos por calentamiento de aminas simples o compuestos fenólicos en presencia de S, no identificables por un cromóforo como la mayor parte de los otros tipos de colorantes (37).

b) Impactos de los colorantes al hombre y ambiente:

Desafortunadamente, el 12 % de los colorantes se evalúan antes de la evacuación a la red receptora, donde permanecen estables y resistentes a la degradación debido a sus propiedades específicas. La

liberación de colorantes ácidos, básicos, reactivos, directos, de cuba y dispersos puede causar daño a los organismos como reacciones alérgicas, efectos cancerígenos, dermatitis, conjuntivitis alérgica, rinitis y asma ocupacional. Sin embargo, muchos colorantes son cancerígenos, resistentes a la degradación y peligrosos, lo que amenaza gravemente la seguridad y la salud humana. Debido a su alta estabilidad térmica y química, muchos colorantes son resistentes a la degradación por la luz, el calor y los oxidantes naturales, lo que hace que remover los colorantes de vertidos residuales sea de extrema importancia (32).

2.3. Definición de términos básicos

- Aguas residuales: consisten en un 99.9 % de agua y 0.1 % restante es material en suspensión o disuelto (43 pág. 3).
- Aguas residuales textiles: son aguas residuales que, por su composición, presentan una variedad de colorantes tóxicos, metales pesados, como mercurio, cromo, cadmio, plomo y arsénico (30).
- Colorante: son compuestos orgánicos que tienen grupos insaturados como los cromóforos en sus estructuras. Estos grupos insaturados son los encargados de dar el color y los grupos funcionales son los responsables de su fijación en las fibras (44).
- Contaminación del agua: proceso donde diversos agentes y compuestos tóxicos, que pueden ser inorgánicos u orgánicos, al ser liberados, llegan a generar desequilibrios en cuerpos hídricos (29).
- Contaminantes emergentes: son químicos de creciente preocupación, cuya toxicidad y persistencia de estos en el ambiente alteran el metabolismo de un ser vivo. Estos son generados por actividades humanas e industriales (45).
- Proceso Fenton: proceso que oxida contaminantes orgánicos con radicales hidroxilo producidos a partir del H_2O_2 e iones de Fe^{2+} como catalizador de la reacción (37).
- Proceso foto-Fenton: es aquel proceso donde se combina el H_2O_2 y radiación UV con iones de Fe^{2+} o Fe^{3+} , por lo que se produce más radicales hidroxilos y aumenta la rapidez de degradación de lo orgánico (46).

- Proceso tipo foto-Fenton: en este proceso los radicales hidroxilos se producen por la reacción de H_2O_2 con iones de baja valencia como Cu^{2+} , Mn^{2+} y Co^{2+} para una degradación completa o mineralización (41).
- Procesos de oxidación avanzada: son aquellos procesos que tienen como propósito formar y utilizar radicales libres de hidroxilo en forma de oxidante fuerte para destruir compuestos que no pueden oxidarse con oxidantes convencionales (33).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

Aquel abordó al método científico, el cual involucró a aplicar pasos fundamentales: problema-hipótesis-contrastación. Toda investigación nace con identificar un problema, para luego plantear hipótesis que llegaran a ser contrastadas (47).

Es evidente la contaminación que produce el vertido de las ART generadas por las empresas textiles del distrito de Hualhuas al alcantarillado o directamente al medio ambiente, por lo cual se formuló la alternativa de solución, se aplicó el proceso de la fotocatalisis con Cu(II), se analizaron los resultados, se discutió y realizó la prueba de hipótesis.

3.1.2. Tipo de investigación

Correspondió a la investigación aplicada, en sentido de aplicación de conocimientos desarrollados en investigaciones básicas y la búsqueda de conocimientos nuevos, pero más específicos. En la investigación, se aplicó la fotocatalisis homogénea con cobre (II) para la decoloración de las ART, para lo cual se manipuló la dosis del cobre (II) y pH; como resultado del

tratamiento se tiene un efluente que no genere impactos negativos al ambiente y probablemente dar algún uso (48).

3.1.3. Nivel de la investigación

Fue explicativo porque se aplicó la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de ART en el distrito de Hualhuas, Junín. En dicha idea, se determinó la dosis de cobre(II) y pH de la fotocatalisis con cobre(II) y evaluó la eficiencia del proceso que se investigó. Además, porque supera la explicación de los fenómenos o de determinar las relaciones entre conceptos, responde los motivos de los fenómenos físicos o sociales (49).

Además, el nivel es explicativo porque en la investigación se procedió a manipular las variables independientes y evaluar la respuesta en la variable dependiente, de forma que se alcancen respuestas a las causas del objeto de estudio (50). En la investigación se manipuló los valores de las variables dosis de cobre(II) y pH y se evaluó el efecto en la decoloración de las ART.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño fue experimental y transversal o transeccional. Es transversal o transeccional porque se recopilaron los datos en un momento único (49). La investigación fue experimental, diseño experimental propiamente dicho, específicamente el diseño factorial. Dicho diseño realiza estudios multivariados y que consta de dos o más factores, cada factor puede tener iguales o distintos niveles o valores, las unidades experimentales involucran las posibles combinaciones de los niveles de factores (50).

El diseño factorial que se usó es de bloques aleatorizados 3×3 o 3^2 , quiere decir dos variables independientes con tres niveles cada una. Todas las posibles combinaciones de los tratamientos se presentan en la siguiente figura.

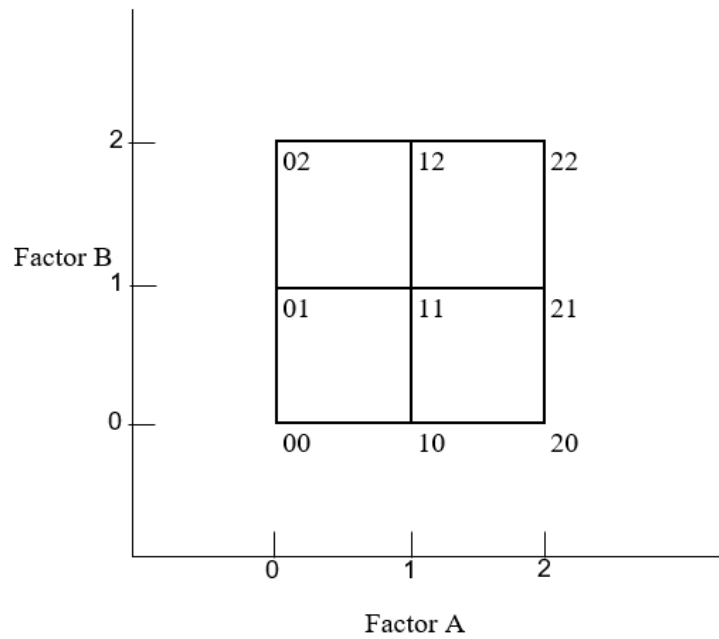


Figura 10. Combinaciones de los tratamientos en el diseño factorial 3².

Fuente: Montgomery (51).

Se detallan en la tabla siguiente (tabla 4) los valores de las variables independientes o factores y sus respectivos niveles codificados.

Tabla 4. Valores de las variables independientes y sus niveles codificados.

Variable independiente	Niveles		
	0	1	2
Dosis de cobre(II) (mg/L)	10	30	50
pH (adimensional)	4,4	7,0	11,0

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Corresponde al conjunto, que puede ser finito o infinito, de sujetos que presentan cualidades comunes entre sí (47). Está conformada por las aguas residuales que descargan las diversas empresas textiles artesanales que se encuentran en el distrito de Hualhuas, Huancayo -

Junín. El tamaño (volumen o cantidad) de la población cambia por la demanda de las prendas de lana de oveja, llama, alpaca y algodón que elaboran las empresas.

3.3.2. Muestra

La muestra es un subgrupo que es representativa de la población o el universo (47). El tamaño de la muestra es 10,8 L de las aguas residuales vertidas por las empresas textiles del distrito de Hualhuas, Huancayo - Junín, al cual se realizó el tratamiento con la fotocatalisis de cobre(II). Para la obtención de la muestra se tuvo que realizar el experimento del teñido, para el proceso de teñido se utilizó la lana de llama, como aditivo se utilizó 10 mL de ácido acético, 20 g de anilina amarilla, agua y leña. El proceso de teñido consistió en hervir el agua luego agregar la lana, juntamente la anilina y el aditivo en la olla. Este proceso duró 2 horas y se tuvo que mover la lana cada 10 minutos. Terminado este proceso se procede a retirar la lana, se deja enfriar la muestra y se procedió a llenar la muestra obtenida de 10,8 L en un balde.

La técnica de muestreo que se empleada fue la no probabilística, concretamente la técnica por conveniencia, puesto que se seleccionaron los casos accesibles que acepten ser incluidos, para lo cual se consideró la viabilidad de acceso y cercanía de la muestra a los investigadores (52). La mayoría de empresas textiles del distrito de Hualhuas y de otros lugares no aceptan que se utilicen sus aguas residuales por temor de los análisis que se realizará y por los posibles problemas que podrían tener; previa coordinación con una empresa, aceptó para participar en el teñido y muestreo de sus ART.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas

La técnica que se utilizó fue el experimento, utilizado ampliamente en la investigación cuantitativa (53). Las técnicas específicas que se utilizaron fueron la espectroscopía de UV, gravimetría y potenciometría para determinar el color de las aguas residuales (inicial y en tratamiento), peso de los reactivos y pH, respectivamente. En el laboratorio se preparó lo necesario para realizar el experimento mediante el cual utilizando instrumentos de medición se recopiló datos. Se realizó la decoloración de las ART con la fotocatalisis con cobre(II), en la cual se manipuló la dosis de cobre(II) y pH, se midió el color del efluente tratado de forma que se determine el grado de decoloración.

3.4.2. Instrumentos

Los instrumentos utilizados en los experimentos en el laboratorio fueron:

- Colorímetro de marca Hanna - HI727, la resolución del equipo es 5 UCP.
- Balanza analítica digital de marca MRC ASB-220-C2-V2.
- Medidor multiparámetro de marca EZDO 7200.
- Agitador magnético con calentamiento de marca DLAB MS-H280-Pro.
- Cronómetro digital.
- Ficha de recolección de datos.

3.5. Metodología de experimentación

3.5.1. Reactivos, materiales y equipos utilizados

Los materiales y otros necesarios que se usaron para el teñido fueron:

- 1 kg de lana de llama.
- 10 mL de ácido acético.
- 20 g de anilina amarilla.
- 10 L de agua.
- Leña.

- Olla.
- Cocina artesanal.
- Balde.

Mientras que los materiales que se usaron en los diferentes experimentos fueron:

- 3 vasos de precipitación de 1 L.
- 2 vasos de precipitación de 250 mL.
- 1 fiola de 250 mL.
- 1 pipeta de 2 mL.
- 1 probeta graduada de 500 mL.
- 1 luna de reloj.
- 1 propipeta.
- 1 espátula.
- 1 frasco lavador.
- 3 varillas de vidrio.
- 3 magnetos para los agitadores magnéticos.
- Viales de vidrio para muestras.

A continuación, se detallan los reactivos que se utilizaron:

- Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) al 98 %.
- Hidróxido de sodio (NaOH).
- Ácido clorhídrico (HCl) fumante al 37 %.
- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 %.
- Agua destilada.

3.5.2. Muestreo

Se realizó la visita al lugar donde expenden prendas y otros productos. La empresa textil se encontró en el distrito de Hualhuas (Carretera Central). Se coordinó con la representante para ser parte del proceso de teñido y al finalizar tomar la respectiva muestra antes de su vertido al alcantarillado, considerando el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA).

El ambiente donde se realizó el teñido se ubica en las coordenadas geográficas: Latitud: -11,9854S, longitud: 75,2607W y altitud 3261,3 m. Las fotografías del local de venta y lugar del teñido se muestran a continuación.



Figura 11. Lugar de venta de la empresa textil.



Figura 12. Ambiente de teñido.

3.5.3. Teñido de la lana de llama

En el teñido de la lana de llama se procedió a:

- Llenar agua en la olla y dejar hervir durante 15 min.
- Mientras va hirviendo el agua, estirar la lana de llama y hacer unos amares en forma de ocho para luego ubicarla en la manejadora.
- Retirar cuidadosamente la madeja de llama de la manejadora y remojar para sacar las impurezas.
- Retirar la lana de llama y escurrirlo bien.
- Agregar la madeja de lana de llama y la anilina al agua que está hirviendo.
- Adicionar el ácido acético (fijador).
- Dejar hervir por 2 h y mover cada 10 min.
- Retirar la lana teñida.



Figura 13. Teñido de lana de llama.

3.5.4. Determinación de la dosis de cobre(II) y pH de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART

El procedimiento que se siguió para determinar los valores recomendados de la dosis de cobre(II) y pH en el tratamiento de ART con la fotocatalisis con cobre consistió en:

- Preparar la solución de cobre(II) de 1 g/L, para ello se realizó:
 - Pesar 0,982 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.
 - Disolver el $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en 200 mL de agua destilada.
 - Verter la solución a una fiola de 250 mL.
 - Aforar con agua destilada y agitar vigor.
- Muestrear las ART del teñido de lana de llama de la empresa textil. En este momento se midió los parámetros físicos: color, temperatura, pH y conductividad eléctrica con el medidor multiparámetro.
- Por otra parte, agregar 550 mL de las ART a un vaso de precipitación de 1 L.
- Trasladar el vaso de precipitación y agitador magnético a un lugar donde la radiación solar incida directamente.
- Encender el agitador magnético, agregar el magneto, fijar la temperatura en 40°C y velocidad de agitación en 1300 rpm. A estas condiciones la temperatura de las aguas residuales es aproximadamente 30°C.
- Agregar 5, 15 o 25 mL de la solución de cobre(II) para lograr la respectiva dosis de 10, 25 o 50 mg/L, respectivamente, según el nivel de la variable de la combinación del tratamiento.
- Agregar las ART al vaso de precipitación hasta lograr 600 mL.
- Fijar el pH en 4,4, 7 o 11 con solución de HCl o NaOH al 0,1 M, según la combinación del tratamiento.
- Agregar 1,35 mL de la solución de H_2O_2 para alcanzar la concentración de 20 mM.
- Luego de 2 h, muestrear 50 mL de las ART tratadas. Las respectivas muestras previamente rotuladas se entregaron a la empresa Grupo JHACC Laboratorio de Análisis Ambientales para la medición del color (ver Anexo A).

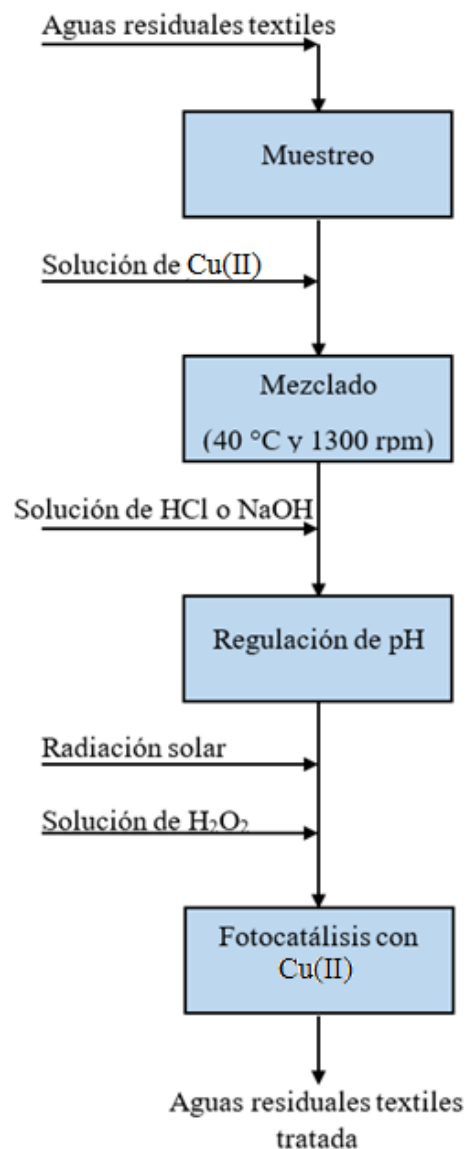


Figura 14. Diagrama de las corridas.

3.5.5. Parámetros físicos de las ART

Para los experimentos en laboratorio, se muestrearon 2 días diferentes las ART y en ese momento se midieron con un medidor multiparámetro sus principales parámetros físicos, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5. *Parámetros físicos de las ART.*

Parámetro	Muestra de ART	
	1	2
Color (Unidades Platino-Cobalto)	1700	1325
Temperatura (°C)	50,5	51,8
pH	4,45	4,49
Conductividad eléctrica (μS)	903	950

Como se observa en la tabla 5, las ART del teñido de lana de llama de color amarillo son ácidas (pH alrededor de 4,5), por lo cual se consideró este valor como nivel bajo del pH para los experimentos con la finalidad de evaluar la decoloración a esta condición. La temperatura es relativamente (alrededor de 51°C) alta debido a que en el proceso de teñido la lana se deja hervir durante 2 h. La conductividad eléctrica de las ART es relativamente baja e indica la baja presencia de sales.

3.5.6. Análisis de los efectos de la fotocatalisis con cobre(II) en la decoloración de las ART

Para el análisis de los efectos de la fotocatalisis con cobre(II) en la decoloración de las ART se elaboró la gráfica de efectos principales de las variables independientes de la dosis de cobre(II) y pH. Aquí se representó los promedios del porcentaje de decoloración para cada variable considerando cada uno de los tres niveles y se observó la tendencia de la decoloración, si aumenta o disminuye, a medida que varía los niveles de las variables independientes.

3.5.7. Evaluación de eficiencia de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART

Para evaluar la eficiencia de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART se comparó el color de las ART tratadas con el color del agua establecidos según las categorías y subcategorías de los

Estándares de Calidad Ambiental (ECA), específicamente se consideró la Categoría 1 (poblacional y recreacional) y Subcategoría A (aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable), Categoría 2 (extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales) y Categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales).

Por otra parte, se calculó la decoloración expresada en porcentaje con la ecuación:

$$\text{Decoloración (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde: C_i es el color de las ART inicial y C_f es el color del ART tratada con la fotocátalisis con cobre(II).

3.5.8. Determinación de la dosis de cobre(II) y pH óptimo de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART

A partir del diseño experimental que se utilizó en la investigación que considera tres niveles para las dos variables independientes y el método de superficie de respuesta se determinó la dosis de cobre(II) y pH óptimo de la fotocátalisis con cobre(II) para alcanzar la máxima decoloración de las ART. Con este método se optimiza la respuesta (decoloración) cuando están implicados dos o más factores cuantitativos (dosis de cobre(II) y pH).

Para este fin se ingresó el porcentaje de decoloración de las ART que se obtuvo a las diferentes combinaciones de la dosis de cobre(II) y pH al software estadístico Minitab - V.19, se definió el diseño experimental, seleccionó el método de superficie de respuesta y se optimizó la respuesta definiendo la máxima decoloración de las ART. Luego del procesamiento realizado por el software, los resultados que se obtiene son la gráfica de contorno, gráfica de superficie y los valores óptimos de las variables independientes. El gráfico de contorno es una representación bidimensional de una superficie en el cual puntos de igual respuesta (decoloración) están unidos y forman líneas de contorno de respuesta constante. El uso de este gráfico es que es útil para predecir o estimar la decoloración de las ART a diferentes las condiciones de operación de dosis

de cobre(II) y pH. Mientras que la gráfica superficie es una representación tridimensional y prácticamente representa la misma utilidad. El software presenta los valores óptimos gráficamente para cada variable, en cada caso presenta el nivel menor y mayor y en el centro el valor óptimo, también estima la máxima decoloración de a las ART a los valores óptimos de las variables independientes. Estos valores óptimos serían las condiciones de dosis de cobre(II) y pH a utilizar en el tratamiento de las ART con la fotocatalisis con cobre(II) y lograr la máxima decoloración.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.1.1. Determinación de la dosis de cobre(II) y pH de la fotocatalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART

a) Medidas estadísticas descriptivas de las variables:

De las mediciones del color de las ART tratadas con la fotocatalisis con cobre(II) se calcularon los principales estadísticos descriptivos, cuyos valores se presentan a continuación.

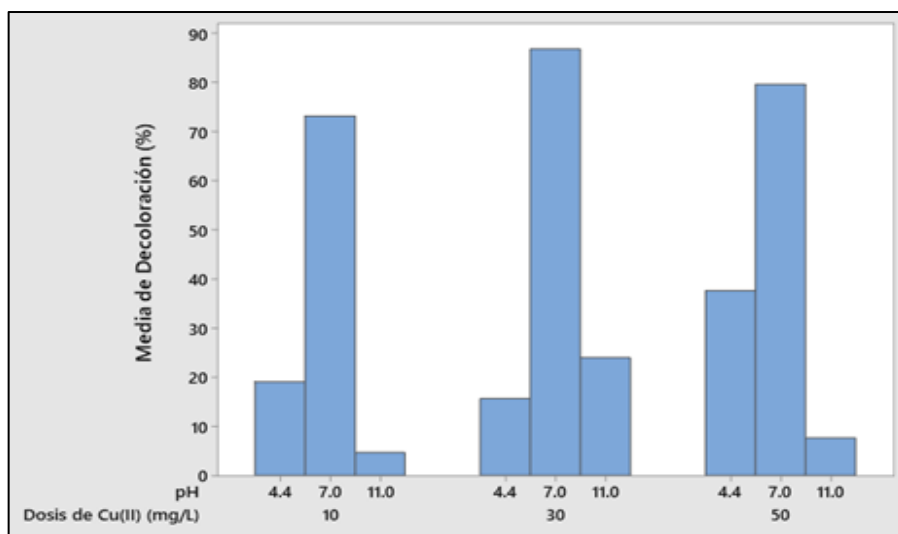


Figura 15. Media de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.

Tabla 6. Principales estadísticos descriptivos del tratamiento de ART con la fotocatalisis con cobre(II).

Estadístico	Dosis de cobre(II) (mg/L)			pH		
	10	30	50	4,4	7,0	11,0
Media	32,292	42,147	41,603	24,113	79,845	12,083
Error estándar	13,245	14,256	13,205	4,503	2,572	3,946
Mediana	19,055	23,970	37,610	20,755	79,580	7,620
Varianza	1052,51	1219,43	1046,15	121,660	39,690	93,430
Desviación estándar	32,442	34,920	32,344	11,030	6,300	9,666

Se muestra, en la figura 15, el promedio del porcentaje de decoloración de las ART en función a las dos variables independientes y sus tres niveles: dosis de cobre(II) (10, 30 y 50 mg/L) y pH (4,4; 7,0 y 11,0), mientras que en la tabla 6, además de los promedios de la decoloración, se presentan los estadísticos descriptivos principales como el error estándar, mediana y varianza en función a las variables y niveles.

- b) Color de las ART después del tratamiento por fotocatalisis con cobre(II):

El color de las muestras tratadas de las ART con la fotocatalisis con cobre(II), expresado en Unidades Platino-Cobalto (PCU), considerando todas las diferentes combinaciones del diseño factorial 3^2 y los tres niveles de los factores: dosis de cobre(II) (10, 30 y 50 mg/L) y pH (4,4, 7,0 y 11,0) llegan a presentarse a continuación (tabla 7).

Tabla 7. Color de las ART después del tratamiento por fotocátalisis con cobre(II).

N°	Dosis de cobre(II) (mg/L)	pH	Color (PCU)	
			I	II
1	10	4,4	1450	1015
2	10	7,0	425	380
3	10	11,0	1625	1260
4	30	4,4	1475	1085
5	30	7,0	250	155
6	30	11,0	1225	1060
7	50	4,4	1050	835
8	50	7,0	335	280
9	50	11,0	1550	1240

De las muestras de ART tratadas, el menor color que se obtuvo es 155 PCU a la dosis de cobre(II) de 30 mg/L y pH de 7,0 a partir de un color inicial de la muestra inicial de 1325 PCU. El color final obtenido que es mayor al requerido (100 PCU) para ser utilizado para regar vegetales o dar a los animales. La menor decoloración que se logró con la fotocátalisis con cobre(II) fue a la dosis de cobre(II) de 10 mg/L y 11,0 respectivamente.

4.1.2. Análisis de los efectos de la fotocátalisis con cobre(II) en la decoloración de ART

Para analizar los efectos de la dosis de cobre(II) y pH en la decoloración de las ART se presenta la gráfica de efectos principales. Aquí se representa en el eje horizontal cada una de las variables independientes con sus respectivos tres niveles y en el eje vertical la decoloración promedio que se logró producto del tratamiento de las ART con la fotocátalisis con cobre(II).

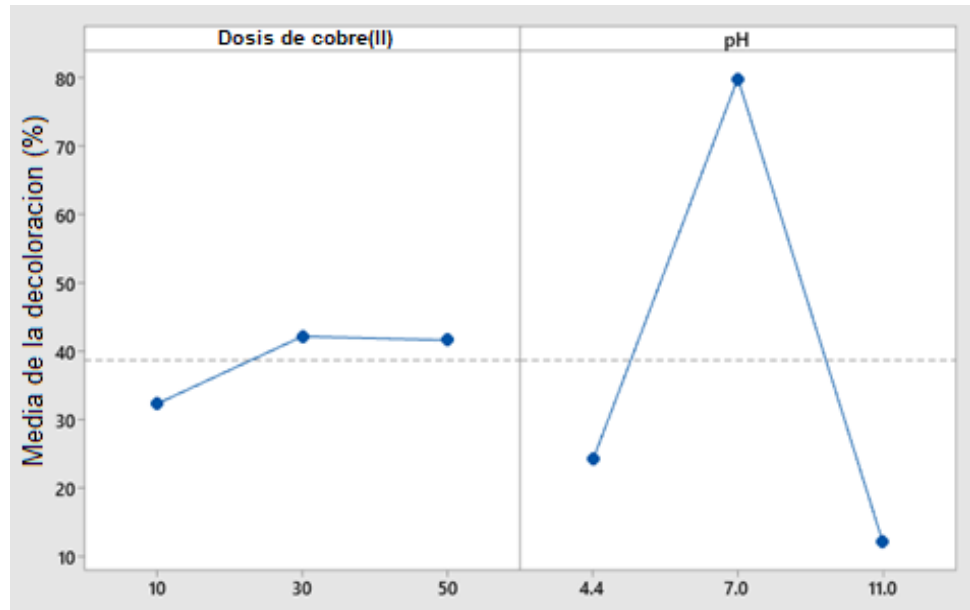


Figura 16. Efectos de la dosis de cobre(II) y pH en la decoloración de las ART con fotocátalisis con cobre(II).

Según la figura 16, el efecto que produce la dosis de cobre(II) es positivo o directo y significa que a mayor dosis la decoloración de las ART se incrementa; si bien es cierto no es considerable y significativa, pero prácticamente la tendencia se evidencia. Mientras que el efecto del pH en la decoloración es cuadrático, por lo que se presenta un valor máximo de 79,8450 % a pH 7 y para valores menores o mayores de pH la decoloración disminuye.

4.1.3. Evaluación de la eficiencia de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de ART

A partir de las mediciones de color a las muestras tratadas con la fotocátalisis con cobre(II) se calculó el porcentaje de decoloración considerando el color inicial de las ART (tabla 5) muestreadas de la empresa textil que se consideró para la investigación.

Tabla 8. Color de las ART después del tratamiento por fotocátalisis con cobre(II).

N°	Dosis de cobre(II) (mg/L)	pH	Decoloración (%)	
			I	II
1	10	4,4	14,71	23,40
2	10	7,0	75,00	71,32
3	10	11,0	4,41	4,91
4	30	4,4	13,24	18,11
5	30	7,0	85,29	88,30
6	30	11,0	27,94	20,00
7	50	4,4	38,24	36,98
8	50	7,0	80,29	78,87
9	50	11,0	8,82	6,42

El mayor porcentaje de decoloración fue 88,30 % a la dosis de cobre(II) de 30 mg/L y pH de 7,0, mientras que la menor decoloración (4,91 %) fue a 10 mg/L y 11,0 respectivamente. A pesar de que la eficiencia de decoloración del proceso que se investigó es relativamente alta, el color de la muestra de ART es mayor a 100 PCU, por lo que este efluente puede utilizarse para obtener agua potable mediante procesos convencionales o avanzados (Categoría 1: Poblacional y Recreacional. Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable), pero no utilizarlo para la extracción, cultivo y otras actividades (Categoría 2), ni para regar vegetales ni dar a los animales (Categoría 3).

4.1.4. Determinación de la dosis de cloro(II) y pH óptimo de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de las ART

Al tener tres niveles para ambas variables independientes es posible determinar los valores óptimos de dosis de cobre(II) y pH óptimo de la fotocátalisis con cobre(II) aplicando el método de superficie. Considerando el modelo cuadrático completo, se presenta, en la siguiente tabla, el nivel de predicción del modelo empírico.

Tabla 9. *Resumen del modelo.*

S	R ²	R ² (ajustado)	R ² (pred)
8,14020	95,31 %	93,36 %	89,75 %

El R² indica que el 95,31 % de los resultados son reproducibles o estimados por el modelo matemático empírico, mientras que el R² ajustado indica que el modelo empírico explica el 93,36 % de la variabilidad de la decoloración. El respectivo modelo matemático empírico de la decoloración se obtuvo utilizando un software estadístico, el cual es:

$$\text{Decoloración (\%)} = - 277,1 + 1,430 \text{ Dosis de cobre(II)} + 89,40 \text{ pH} - 0,0130 \text{ Dosis de cobre(II)} \times \text{Dosis de cobre(II)} - 5,815 \text{ pH} \times \text{pH} - 0,0559 \text{ Dosis de cobre(II)} \times \text{pH}$$

Tabla 10. *Coefficientes codificados.*

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	84.89	4.44	19.10	0.000	
Dosis de cobre(II)	4.40	2.36	1.86	0.087	1.01
pH	-6.01	2.35	-2.56	0.025	1.01
Dosis de cobre(II)*Dosis de cobre(II)	-5.20	4.07	-1.28	0.225	1.00
pH*pH	-63.32	4.29	-14.75	0.000	1.01
Dosis de cobre(II)*pH	-3.69	2.86	-1.29	0.221	1.01

De la tabla de coeficientes codificados se concluye que, al ser los valores de p menor a 0,05, el pH y pHx pH son significativos sobre la decoloración, pero no el resto de términos como la dosis de cobre(II). Considerando los resultados del análisis de varianza (tabla 10), indica que falta de ajuste por ser menor a 0,05 (0,000), por lo cual se procedió a eliminar los términos que no son significativos (dosis de cobre(II) x dosis de cobre(II) y dosis de cobre(II) x pH) en la decoloración; pero los resultados igual indican que existe falta de ajuste, por lo cual se acepta el modelo que se obtuvo considerando el modelo cuadrático completo.

Entre los resultados obtenidos, tenemos las gráficas de superficie y contorno, los cuales se presentan en la figura 17 y 18 respectivamente.

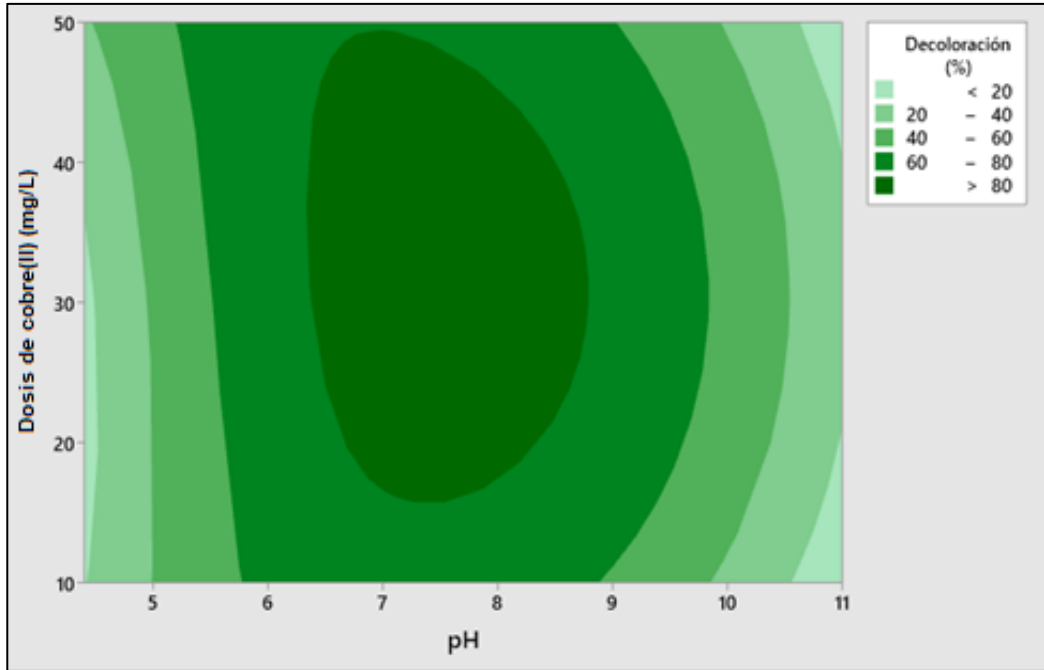


Figura 17. Gráfica de contorno de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.

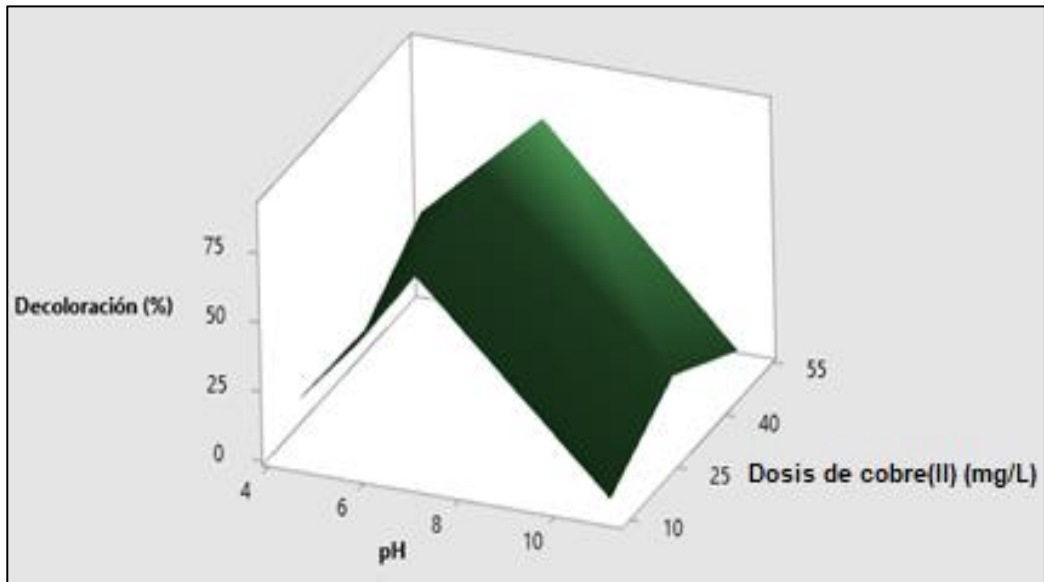


Figura 18. Gráfica de superficie de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.

De las figuras, una decoloración mayor al 80 % se obtiene cuando el pH es entre 7 y 8, y cuando la dosis de cobre(II) varía entre 20 y 50 mg/L. Un porcentaje menor de decoloración al 20 % es cuando el pH es menor a 4 o alrededor de 11, la dosis de cobre(II) prácticamente no influye a estas condiciones. También se observa el efecto directo o positivo de la dosis de cobre(II) y cuadrático del pH.

Finalmente, se presentan los resultados finales de la optimización.

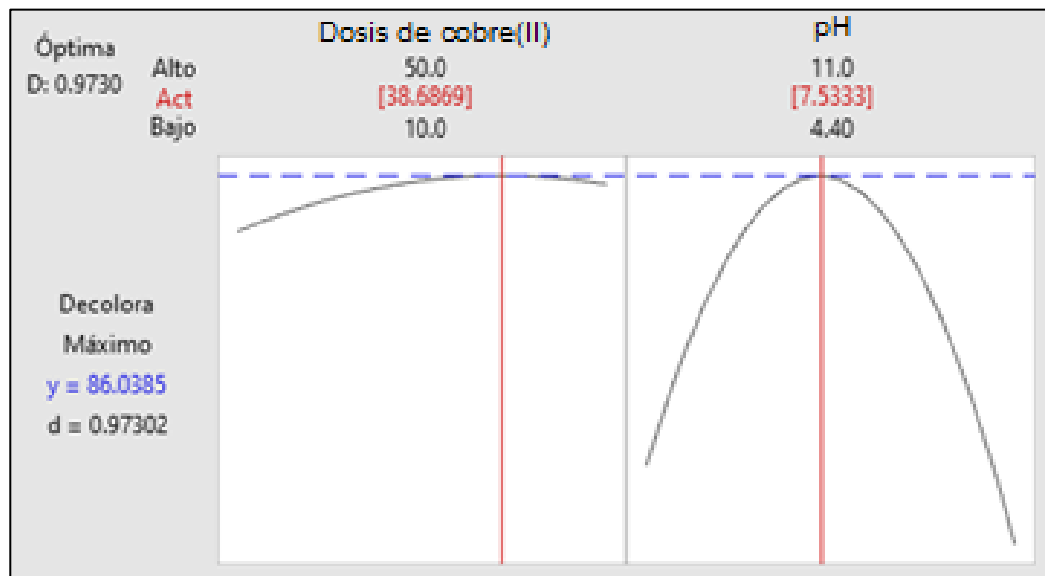


Figura 19. Optimización de respuesta de la decoloración en función a la dosis de cobre(II) y pH.

Como se observa en la figura los valores óptimos de la dosis de cobre(II) y pH son 38,6869 mg/L y 7,5333 respectivamente, a estas condiciones el máximo porcentaje de decoloración es 86,0385 % \pm 0,9730.

4.2. Prueba de hipótesis

En la presente sección, se evaluó el efecto de la dosis de cobre(II) y pH en la decoloración de las ART por fotocátalisis con cobre(II) mediante el análisis de varianza, considerando el diseño de bloques aleatorizados 3×3 o 3^2 que se utilizó y el procesamiento de datos. El planteamiento de hipótesis consiste en:

- H_0 = El efecto de la dosis de cobre(II) y pH no están presentes en la decoloración de las ART por fotocátalisis con cobre(II).
- H_1 = El efecto de la dosis de cobre(II) y pH están presentes en la decoloración de las ART por fotocátalisis con cobre(II).

En la tabla 11 se presentan los respectivos resultados.

Tabla 11. *Análisis de varianza.*

Fuente	gl	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	16165,0	3233,0	48,79	0,000
Lineal	2	664,2	332,1	5,01	0,026
Dosis de cobre(II)	1	230,1	230,1	3,47	0,087
pH	1	434,0	434,0	6,55	0,025
Cuadrado	2	14520,3	7260,2	109,57	0,000
Dosis de cobre(II) x Dosis de cobre(II)	1	108,2	108,2	1,63	0,225
pH x pH	1	14412,1	14412,1	217,50	0,000
Interacción de 2 factores	1	110,6	110,6	1,67	0,221
Dosis de cobre(II) x pH	1	110,6	110,6	1,67	0,221
Error	12	795,2	66,3		
Falta de ajuste	3	697,8	232,6	21,51	0,000
Error puro	9	97,3	10,8		
Total	17	16960,2			

En la tabla 11 se evalúa el efecto de las variables independientes e interacciones dosis de cobre(II) y pH a través de la significancia. También considera el efecto cuadrático de ambas variables. Como parte del análisis de varianza se calcula los grados de libertad (gl), suma de cuadrados ajustada (SC Ajust.), cuadrados medios ajustados (MC Ajust.), valor en la distribución (F) y la significancia (p).

De los resultados, se acepta la hipótesis alternativa porque la significancia asintótica es menor que 0,05 para pH y pH x pH, concluyendo que influyen en la decoloración de las ART por fotocátalisis con cobre(II), mientras que la dosis de cobre(II) ni la interacción de las variables independientes no influyen significativamente en la decoloración.

Para complementar los resultados del ANOVA se presenta el diagrama de Pareto (figura 20).

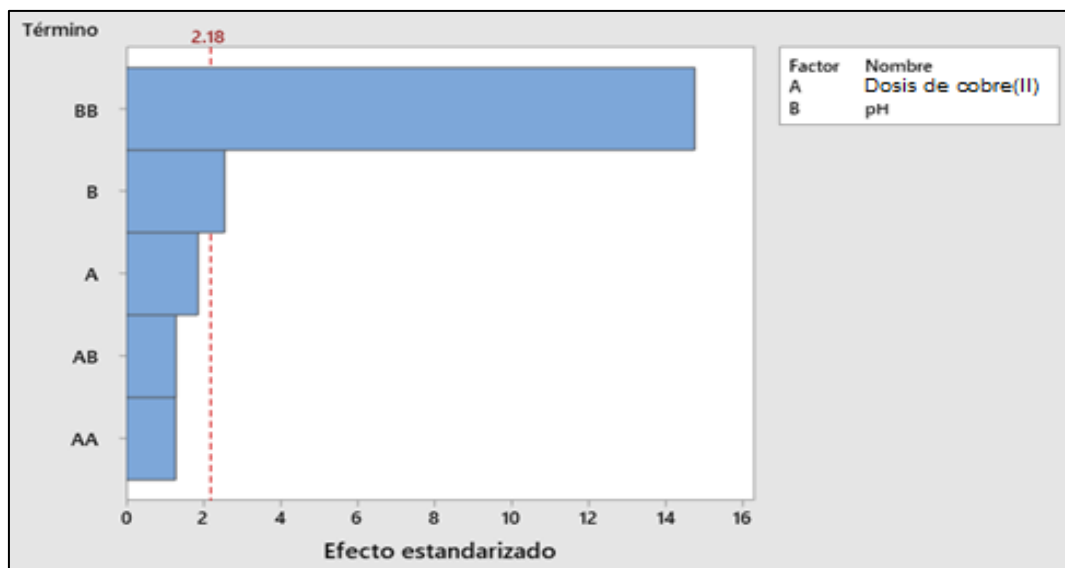


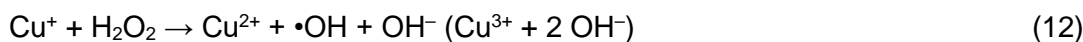
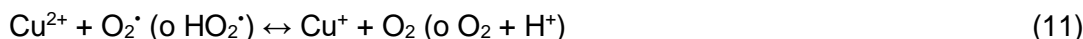
Figura 20. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

De la figura 20, las barras para pH x pH y pH, en ese orden, superan la línea de referencia por lo que estadísticamente son significativas en la decoloración de las ART por fotocátalisis con cobre(II). La dosis de cobre(II), dosis de cobre(II) x pH y dosis de cobre(II) x dosis de cobre(II) no influyen en la decoloración.

4.3. Discusión de resultados

En el estudio se manipuló la dosis de cobre(II) y pH para la decoloración de las ART con la fotocátalisis tipo foto-Fenton, considerando que el color del efluente del tratamiento es mayor a 100 PCU (valor máximo para ser considerado como aguas de Categoría 2 y 3) se deben considerar y evaluar a las otras variables que influyen en este proceso, los cuales son la cantidad y forma de adición de H₂O₂ y temperatura de tratamiento.

En forma general, los POA se caracterizan porque producen radicales hidroxilo y son los responsables de la oxidación y degradación de los contaminantes. En la literatura, según los investigadores se encuentran diversas reacciones químicas que explican la producción de los radicales las cuales pueden presentar diferencias en el detalle, específicamente en la fotocátalisis con cobre(II) y considerando lo planteado por Lee *et al.* (16), reacciones químicas que explican la producción de las distintas especies de oxígeno reactivas como •OH, HO₂• y Cu³⁺) son:



En la Ec. (9) el Cu^{2+} se reduce a Cu^+ por la acción del H_2O_2 y se produce el $\text{HO}_2\cdot$ (radical hidroperoxilo). En la Ec. (11), el $\text{HO}_2\cdot$ reduce otra molécula de Cu^{2+} . Finalmente, en la Ec. (12) se produce la reacción irreversible de Cu^+ con H_2O_2 y hay producción de los oxidantes $\cdot\text{OH}$ o Cu^{3+} , de esa manera este proceso es cíclico.

La decoloración que se logró a la dosis de cobre(II) de 10, 30 y 50 mg/L es 32,2917 % \pm 13,2445, 42,1467 % \pm 14,2562 y 41,6033 % \pm 13,2045 respectivamente. Se evidencia que la relación directa entre la dosis y decoloración de las ART producto del tratamiento. La lógica indica que si queremos aumentar la decoloración de las ART se tendría que incrementar la cantidad o dosis del catalizador cobre(II) y con ello la dosis de H_2O_2 para producir más especies oxidantes como radicales hidroxilos, pero el problema es cuando las concentraciones de cobre(II) es relativamente alta, el color de los vertidos residuales sujetos a mejora es mayor por la coloración que presenta la solución de cobre(II) (azul).

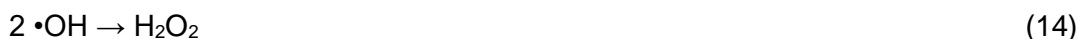
Por otra parte, a valores de pH de 4,4; 7,0 y 11,0 se decoloró las ART por fotocátalisis con cobre(II) en 24,1133 % \pm 4,5030, 79,8450 % \pm 2,5719 y 12,0833 % \pm 3,9462 respectivamente. En forma general, en las investigaciones se presentan diferentes resultados respecto al pH, por ejemplo, Sun *et al.* (15) y Navarro *et al.* (11) determinaron el pH de 3 como óptimo. Hong *et al.* (20) indican que cuando el pH es mayor a 3 se precipitaría el Cu^{2+} como $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y no se produciría la oxidación de Cu^+ a Cu^{2+} . Cuando el pH es menor a 3, la concentración de H^+ es alta y la consecuencia sería que limitaría la reducción de Cu^{2+} en Cu^+ y con ello la producción de $\cdot\text{OH}$. De los resultados y lo que se observó en los experimentos, a pH 7 no se formó precipitados y la decoloración fue mayor que al pH menor y mayor.

El porcentaje de decoloración fue 88,30 % a la dosis de cobre(II) de 30 mg/L y pH de 7,0 mientras con los valores óptimos de 38,6869 mg/L y 7,5333 respectivamente, el máximo porcentaje de decoloración estimado es 86,0385 % \pm 0,9730. No se identificó, a nivel de antecedentes, algún similar estudio al que se investigó, para efectos de comparación se presenta los resultados de investigaciones similares en la cual aplicaron POA que utilizan como catalizador al cobre en el tratamiento de

aguas residuales. Navarro *et al.* (11) aplicaron el tratamiento basado en Fenton no electrolítico a una solución de desecho del cobreado real que contenía una mezcla de ácido tartárico, formaldehído y ácido fórmico, a pH 3 lograron una eliminación cercana al 99 % de COT y DQO. Zhang *et al.* (13) degradaron fenol por el proceso foto-Fenton heterogéneo con catalizadores de Fe/Cu/Al, la capacidad catalítica de los catalizadores alcanzó el 88,0 % y 75,6 % a pH 4,5 y 5,5, y la eliminación alcanzó el 95,4 % a 65°C en 20 min. Sharma *et al.* (14) utilizaron como fotocatalizador nanopartículas (NP) de CuO pristinas y NP de CuO dopadas con selenio para mejorar la degradación del 4-bromofenol y alcanzaron una degradación del 99,5 % en 90 min. Sun *et al.* (15) realizaron la degradación de colorantes orgánicos (naranja de metilo, azul de metilo y rodamina B) con catalizadores Cu₂O-Cu/C tipo el proceso Fenton, degradaron el anaranjado de metilo (MO) al 100 % para las soluciones de MO con 20 mg/L y 50 mg/L, y lograron una eficiencia de eliminación de más del 95 % para la solución de MO con concentraciones superiores a 80 mg/L. Lee *et al.* (16) realizaron la degradación oxidativa del diclofenaco (DCF) y carbamazepina (CBZ) por el sistema Fenton (Cu(II)/H₂O₂) y sistema foto-Fenton (UV/Cu(II)/H₂O₂), la degradación de CBZ fueron el 45 % y 20 % en el sistema UV/H₂O₂ y UV/Cu(II)/H₂O₂ a pH 3 y 7 respectivamente. Dong *et al.* (17) realizaron la destrucción aeróbica total de contaminantes azo (naranja de metilo (MO, 20 mg/L), rojo congo (CR, 20 mg/L), rodamina B (RhB, 5 mg/L), azul de metileno (MB, 10 mg/L) y pentaclorofenol sódico (NaPCP, 10 mg/L) con cobre de valencia cero a nanoescala a pH neutro, los resultados revelaron que alrededor del 56,1 % de MO y 59,6 % de CR se mineralizaron en 4 h, mientras que el 93,0 % de RhB, 59,0 % de MB y 34 % de NaPCP podrían eliminarse aeróbicamente con nZVC en una semana. Temel *et al.* (18) desarrollaron nuevos sistemas catalíticos para degradar el 4-clorofenol, 2,4-diclorofenol y 2,4,6-triclorofenol, usaron TiO₂ o TiO₂ cargado con plata al 1 % (Ag-TiO₂). En los sistemas catalíticos homogéneos Fenton [Fe(II)/H₂O₂] y tipo Fenton [Cu(II)/H₂O₂ y V(IV)/H₂O₂] emplearon concentraciones de CP más altas (1×10^{-2} mol/L). Para el método tipo Fenton, que involucra a iones de cobre [Cu(II)/H₂O₂], no observaron degradación para el 4-CP y obtuvieron una degradación baja (28,8 %) para el 2,4-DCP; pero lograron una degradación alta para el 2,4,6-TCP (63,3 %). Hong *et al.* (20) realizaron la degradación de rodamina B (RhB) a 0,167 mmol/L con el proceso UV/Cu²⁺/H₂O₂ y los resultados muestran que degradó por completo en 30 min.

De los antecedentes nacionales se destaca a Salas (21), quien evaluó la eficiencia del proceso foto-Fenton en la degradación de colorantes de efluentes de la industria textil y logró degradar el 94 % respecto al índice de color y redució el 80 % de la DQO, 62 % de la DBO y 31 % de los SST. García y Oré (22) degradaron el azul de metileno en 95 % con el proceso Fenton like homogéneo. Riveros (23) aplicó el FeOCl como catalizador heterogéneo en el proceso Fenton, foto-Fenton y fotocátalisis en la degradación del verde de bromocresol y logró con el proceso foto-Fenton el 93 % en 15 min. Revilla (24) investigó el oxiclورو de hierro (FeOCl) como catalizador para el proceso Fenton y fotocátalisis para degradar el colorante Rodamina B y logró una decoloración de mas del 90 % a un pH de 3,6 en 25 y 20 min respectivamente. Gutiérrez (25) aplicó un proceso combinado (fotoquímico - electroquímico) para muestras sintéticas de la industria textil que contiene tres colorantes reactivos y un DQO inicial de 1458 mg/L y concluyó que el método combinado redujo la carga orgánica persistente en 97,7 %. Ríos y Orihuela (26) determinaron la cinética del colorante y relación quelante: Fe(III) y tiempo de tratamiento y decoloraron el 95.86 % y 83.99 % para la relación de 1.5:1 y 2:1 sin calentamiento, y con calentamiento es 85.97 % y 93.88 % respectivamente. Bernardo (27) aplicó el proceso Fenton para tratar ART y obtuvo la reducción del 68,8 %, 99,97 %, 96,8 % y 82,5 % para los sólidos totales, conductividad eléctrica, turbidez y DQO respectivamente.

La tendencia de incrementar la cantidad de cobre(II) para producir más especies oxidantes es la misma para la dosis de H₂O₂, también presenta una relación directa con el porcentaje de decoloración hasta cierto nivel, por lo cual es necesario determinarlo mediante experimentos. Hong *et al.* (20) y Sun *et al.* (15) indican que en exceso de •OH hay la posibilidad de que pueda reaccionar con H₂O₂ y producir HO₂• (1,7 eV), este radical también es oxidante, pero presenta un menor poder de oxidación que •OH (2,8 eV), de esa manera la cantidad de •OH es baja para la degradación del contaminante. Las reacciones químicas que muestran lo que se detalló fue propuesta por Zhang *et al.* (13):



El pH está relacionado con el H_2O_2 , Navarro *et al.* (11) degradaron casi totalmente en 2 h y aproximadamente el 20 % del H_2O_2 estaba presente a pH 3, pero a pH 4 el H_2O_2 desapareció, quiere decir que a este pH el H_2O_2 se degrada.

Gran parte de las investigaciones que necesitan una fuente de energía (procesos foto-Fenton) utilizan fuentes artificiales de UV, Hong *et al.* (20) resaltan que es importante en la reducción de Cu^{2+} y Cu^+ , y por lo que controla la degradación fotocatalítica. La tendencia es utilizar la radiación UV que está presente en la radiación solar por nuestra zona presenta una alta incidencia. Para asegurar que la energía sea suficiente, los experimentos fueron desarrollados en días soleados, es cierto que cuando la radiación solar es baja (días con presencia de nubes) no hay otra opción que utilizar fuentes artificiales.

En los experimentos, la temperatura de las ART fue $30^\circ C$ debido a que se buscó aprovechar la temperatura con la que se descarga este efluente, la razón es que la velocidad de decoloración es mayor a medida que se incrementa la temperatura de las ART, según Sun *et al.* (15) se favorece la interacción del catalizador con H_2O_2 para producir las especies oxidantes y la difusión molecular. Esta temperatura no debe ser tan alta, porque a $60^\circ C$ puede descomponerse y reducir la producción de $\bullet OH$.

Otro parámetro que influye en la decoloración de ART o degradación de contaminantes es su concentración inicial, en las investigaciones que aplicaron la fotocatalisis con cobre(II) la concentración es relativamente baja.

El tiempo de reacción o tratamiento fue 2 h debido a que en los minutos iniciales la decoloración es significativa por la descomposición rápida del H_2O_2 en $\bullet OH$, luego es lento y la decoloración no es significativa. En los experimentos después de aproximadamente 1 h se notó claramente la decoloración. Una opción para aumentar el porcentaje de decoloración que se demostraron en otras investigaciones es agregar el H_2O_2 en fracciones y no solo al inicio como se realizó en la tesis.

CONCLUSIONES

1. Es posible decolorar has ART hasta 250 PCU con la fotocátalisis con cobre(II), el color del efluente tratado al ser mayor a 100 PCU no puede utilizarse para la extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales (Categoría 2) ni para regar vegetales ni dar a los animales (Categoría 3). El uso que puede darse es para obtener agua potable mediante procesos convencionales o avanzados (Categoría 1), (no se encontró norma vigente para realizar comparación de los LMP para aguas residuales textiles).
2. La dosis de cobre(II) y pH de la fotocátalisis con cobre(II) para producir la mayor decoloración de ART es 30 mg/L y 7,0 respectivamente, pero los valores óptimos son 38,6869 mg/L y 7,5333 respectivamente.
3. El efecto de la dosis de cobre(II) es positivo por lo que a mayor dosis la decoloración de las ART se incrementa, pero no es significativa, mientras que el efecto del pH en la decoloración es cuadrático, presenta un valor máximo de 79,8450 % a pH de 7 y para valores menores o mayores la decoloración disminuye.
4. El mayor porcentaje de decoloración fue 88,30 % a la dosis de cobre(II) y pH de 30 mg/L y 7,0 respectivamente, y la menor decoloración (4,91 %) fue a 10 mg/L y 11,0 respectivamente. A las condiciones óptimas, el máximo porcentaje de decoloración estimado es $86,0385 \% \pm 0,9730$.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar la decoloración de las ART para dosis de cobre(II) entre 30 y 50 mg/L.
2. Investigar la decoloración de las ART a temperaturas del efluente entre 30 y 60°C.
3. Determinar mediante experimentos la dosis de H₂O₂ debido a que en la investigación fue constante en 20 mM y se sabe que influye en la decoloración de las ART.
4. Estudiar la forma de agregar el H₂O₂ en fracciones y no solo al inicio como se realizó en la tesis.
5. Utilizar otros POA para decolorar ART como la fotocatalisis heterogénea, ozonización y sonólisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ZHU, Y., y otros. A critical review on metal complexes removal from water using methods based on Fenton-like reactions: Analysis and comparison of methods and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414, 1-12 pp.
- (2) PEDANEKAR, R., SHAIKH, S. y RAJPURE, K. Thin film photocatalysis for environmental remediation: A status review. *Current Applied Physics*, 2020, 20(8), 931-952 pp.
- (3) ANTONOPOULOU, M, y otros. An overview of homogeneous and heterogeneous photocatalysis applications for the removal of pharmaceutical compounds from real or synthetic hospital wastewaters under lab or pilot scale. *Science of The Total Environment*, 2021, 765, 1-24 pp.
- (4) PESQUEIRA, J., PEREIRA, M. y SILVA, A. A life cycle assessment of solar-based treatments (H_2O_2 , TiO_2 photocatalysis, circumneutral photo-Fenton) for the removal of organic micropollutants. *Science of The Total Environment*, 2021, 761, 1-11 pp.
- (5) BOCZKAJ, G. y FERNANDES, A. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: A review. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 320, 608-633 pp.
- (6) VERMA, P., y otros. Copper-ligand complex for the decolorization of synthetic dyes. *Chemosphere*, 2004, 57(9), 1207-1211 pp.
- (7) COVINICH, L., y otros. Oxidation of hazardous compounds by heterogeneous catalysis based on Cu/Al_2O_3 system in Fenton-type reactions. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2017, 46(24), 1745-1781 pp.
- (8) VIEIRA, W., y otros. Latest advanced oxidative processes applied for the removal of endocrine disruptors from aqueous media - A critical report. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4), 1-22 pp.
- (9) LUO, W., y otros. ZnS: Cu powders with strong visible-light photocatalysis and photocatalysis for room-temperature dye decomposition. *Ceramics International*, 2020, 46(8), 1-26 pp.
- (10) FANG, M., y otros. CuO nanosheet as a recyclable Fenton-like catalyst prepared from simulated Cu(II) waste effluents by alkaline H_2O_2 reaction. *Environmental Science: Nano*, 2019, 6(1), 105-114 pp.
- (11) NAVARRO, R., ICHIKAWA, H. y TATSUMI, K. Fenton-based treatment of electroless copper plating waste for organics mineralization and CuO recovery. *Green Chemistry*, 2019, 21(9), 2273-2278 pp.

- (12) PORRAS, J., y otros. Fe and Cu in humic acid extracts modify bacterial inactivation pathways during solar disinfection and photo-Fenton processes in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, 235, 75-83 pp.
- (13) ZHANG, J., ZHANG, X. y WANG, Y. Degradation of phenol by a heterogeneous photo-Fenton process using Fe/Cu/Al catalysts. *RSC Advances*, 2016, 6(16), 13168-13176 pp.
- (14) SHARMA, A. y DUTTA, R. Se-doped CuO NPs/H₂O₂/UV as a highly efficient and sustainable photo-Fenton catalytic system for enhanced degradation of 4-bromophenol. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185, 464-475 pp.
- (15) SUN, B., y otros. Degradation of organic dyes over Fenton-like Cu₂O-Cu/C catalysts. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(42), 14011-14021 pp.
- (16) LEE, H., LEE, H. y LEE, C. Degradation of diclofenac and carbamazepine by the copper(II)-catalyzed dark and photo-assisted Fenton-like systems. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 245, 258-264 pp.
- (17) DONG, G., AI, Z. y ZHANG, L. Total aerobic destruction of azo contaminants with nanoscale zero-valent copper at neutral pH: Promotion effect of *in-situ* generated carbon center radicals. *Water Research*, 2014, 66, 22-30 pp.
- (18) TEMEL, N. y SOKMEN, M. New catalyst systems for the degradation of chlorophenols. *Desalination*, 2011, 281(1), 209-214 pp.
- (19) PHAM, A., y otros. Fenton-like copper redox chemistry revisited: Hydrogen peroxide and superoxide mediation of copper-catalyzed oxidant production. *Journal of Catalysis*, 2013, 301, 54-64 pp.
- (20) HONG, J., y otros. Degradation of rhodamine B using UV/Cu²⁺/H₂O₂ system. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, 2009, 627-630 pp.
- (21) SALAS, J. Degradación de colorantes en efluentes provenientes de industrias textiles usando proceso de oxidación avanzada. Tesis (Título de Ingeniero Industrial). Arequipa: Universidad Católica Santa María, 2017.
- (22) GARCÍA, D. y ORÉ, E. Degradación del azul de metileno con hierro recuperado del drenaje ácido de mina aplicando el proceso Fenton like homogéneo. 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2020.
- (23) RIVEROS, M. Estudio de la degradación de verde de bromocresol en agua usando oxiclورو de hierro (FeOCl) como catalizador heterogéneo en los procesos de oxidación avanzada Fenton, foto-Fenton y fotocatalisis. Tesis (Título de Químico Farmacéutico). Arequipa: Universidad Católica de Santa María, 2022.

- (24) REVILLA, C. Síntesis y caracterización del catalizador oxiclورو de hierro (FeOCl) en procesos de oxidación avanzada y su aplicación en la degradación del colorante Rodamina B. Tesis (Título de Químico Farmacéutico). Arequipa: Universidad Católica de Santa María, 2022.
- (25) GUTIÉRREZ, C. Depuración fotoquímica-electroquímica de compuestos orgánicos persistentes en agua residual sintética de la industria textil Puente Piedra-Lima. Tesis doctoral. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2020.
- (26) RIOS, L. y ORIHUELA, R. Determinación de la cinética de decoloración del rojo directo en medio acuoso por foto Fenton con agente quelante. Tesis (Título de Ingeniero Químico). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2022.
- (27) BERNARDO, A. Tratamiento de aguas residuales en una fábrica textil por oxidación avanzada (Fenton), Lima - Perú. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Lima: Universidad Científica del Sur, 2021.
- (28) RAJBONGSHI, B. Photocatalyst: mechanism, challenges, and strategy for organic contaminant degradation. En: *Handbook of Smart Photocatalytic Materials*, 2020. ISBN: 9780128190494.
- (29) PATHANIA, D., THAKUR, M. y SHARMA, A. Photocatalytic degradation of pesticides. En: *Nano-Materials as Photocatalysts for Degradation of Environmental Pollutants*, 2020. ISBN: 9780128185988.
- (30) AL-TOHAMY, R., y otros. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 231, 1-17 pp.
- (31) AL-KDASI, A., y otros. Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes - A review. *Global Nest: the Int. J.*, 2004, 6(3), 222-230 pp.
- (32) OSAGIE, C., y otros. Dyes adsorption from aqueous media through the nanotechnology: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14, 2195-2218 pp.
- (33) AMETA, R., y otros. Photocatalysis. En: *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*, 2018. ISBN: 9780128105252.
- (34) DOMINGUES, E., y otros. Advanced oxidation processes perspective regarding swine wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 2021, 776, 1-17 pp.

- (35) CHENG, M., y otros. Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: A review. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284, 582-598 pp.
- (36) WANG, J. y WANG, S. Toxicity changes of wastewater during various advanced oxidation processes treatment: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 315, 1-13 pp.
- (37) GÜRSES, A., GÜNEŞ, K. y ŞAHİN, E. Removal of dyes and pigments from industrial effluents. En: *Green Chemistry and Water Remediation: Research and Applications*, 2021. ISBN: 9780128177426.
- (38) O'DOWD, K. y PILLAI, S. Photo-Fenton disinfection at near neutral pH: Process, parameter optimization and recent advances. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5), 1-27 pp.
- (39) RIBEIRO, J. y NUNES, M. Recent trends and developments in Fenton processes for industrial wastewater treatment - A critical review. *Environmental Research*, 2021, 197.
- (40) YI, H., y otros. Critical review of advanced oxidation processes in organic wastewater treatment. *Chemosphere*, 2021, 275, 1-27 pp.
- (41) VERMA, M., y otros. Application of biological and advanced oxidation processes (AOPs) for the remediation of wastewater laden with toxic pollutants. En: *Removal of Toxic Pollutants Through Microbiological and Tertiary Treatment*, 2020. ISBN: 9780128210147.
- (42) LI, J., y otros. Recent advances in Cu-Fenton systems for the treatment of industrial wastewaters: Role of Cu complexes and Cu composites. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 392.
- (43) AMETA, S. y AMETA, R. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. En: *Emerging Green Chemical Technology*, 2018. ISBN: 9780128105252.
- (44) ATALAY, S. y ERSOZ, G. Hybrid application of advanced oxidation processes to dyes' removal. En: *Green Chemistry and Water Remediation: Research and Applications*, 2021. ISBN: 9780128177426.
- (45) DA SILVA, D., y otros. Emerging contaminants in environment: Occurrence, toxicity, and management strategies with emphasis on microbial remediation and advanced oxidation processes. En: *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*, 2020. ISBN: 9780128211991.
- (46) AMETA, R., y otros. Fenton and Photo-Fenton Processes. En: *Advanced Oxidation Processes For Wastewater Treatment*, 2018. ISBN: 9780128105252.

- (47) ARIAS, J. y COVINOS, M. *Diseño y metodología de la investigación*. Enfoques Consulting EIRL, 2021. ISBN: 9786124844423.
- (48) MARTÍNEZ, A. *Diseño de investigación. Principios teórico-metodológicos y prácticos para su concreción*. Anuario Escuela de Archivología IV 2012-2013, 2013.
- (49) HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ-COLLADO, C. y BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill, 2014. ISBN: 978-1-4562-2396-0.
- (50) SÁNCHEZ, H., REYES, C. y MEJÍA, K. *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística*. Lima: Universidad Ricardo Palma, 2018. ISBN: 9786124735141.
- (51) MONTGOMERY, D. *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley, 2004.
- (52) OTZEN, T. y MANTEROLA, C. Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol.*, 2017, 35(1), 227-232 pp.
- (53) BERNAL, C. *Metodología de la investigación. Administración, Economía, Humanidades y Ciencias Sociales*. Prentice Hall, 2010.

ANEXOS

Anexo A. Certificado de los análisis de laboratorio de color.



INFORME DE ENSAYO N° 1-0005/23

Pág. 1/1

Solicitante : Yesica Betzabet Cusiche Medina
 Didamia Barrios Reyes
 Hans Omar Surichapi Espinoza

Domicilio legal : Paradero 5 - Jr. Tacna y Arica - Pilcomayo
 Jr. Tarapaca 550 - Huancayo
 Cuzco 523 - Yauvos - Jauja

Proyecto : Fotocatálisis con cobre (II) para decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín 2022

Muestra(s) Declarada(s) : Muestras tratadas

Procedencia de la Muestra : _____

Lugar de Muestreo : _____

Cantidad de muestras para el Ensayo : 10 muestras x 100 mL

Forma de Presentación : 10 Frascos de Plástico

Fecha de Recepción : 26/01/23

Fecha de Inicio del Ensayo : 26/01/23

Fecha de Término del Ensayo : 27/01/23

Fecha de Emisión de Informe : 30/01/23

N° de Cotización de Servicio : _____



Código del cliente	Color (PCU)
Y001	1015
Y002	380
Y003	1260
Y004	1085
Y005	155
Y006	1060
Y007	835
Y008	280
Y009	1240
Y010	1325

- Lugar y condiciones ambientales del muestreo: Indicado por el cliente
- El cliente renuncia al derecho de la dirimencia

Método de Análisis:

Color: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2120 B, 23rd Ed.2017. Método de comparación visual

Huancayo, 30 de Enero de 2023

GRUPO JHACC S.A.C.

Ing. Henry R. Ochoa León
 D.P. N° 124232
 JEFE DE LABORATORIO

*El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC

*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-6J

Rev: 01

Jr. Santa Rosa N° 1361 - El Tambo, Huancayo - Perú Celular: 971 718825 - 954 416149 - 956 988682
 Correo: proyectos@grupojhacc.com / administracion@grupojhacc.com
 www.grupojhacc.com

INFORME DE ENSAYO N° 1-0005/23

Pág. 1/1

Solicitante : Yesica Betzabet Cusiche Medina
 Didamia Barrios Reyes
 Hans Omar Surichapi Espinoza

Domicilio legal : Paradero 5 - Jr. Tacna y Arica - Pilcomayo
 Jr. Tarapaca 550 - Huancayo
 Cuzco 523 - Yauvos - Jauja

Proyecto : Fotocatálisis con cobre (II) para decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín 2022

Muestra(s) Declarada(s) : Muestras tratadas

Procedencia de la Muestra : _____

Lugar de Muestreo : _____

Cantidad de muestras para el Ensayo : 10 muestras x 100 mL

Forma de Presentación : 10 Frascos de Plástico

Fecha de Recepción : 26/01/23

Fecha de Inicio del Ensayo : 26/01/23

Fecha de Término del Ensayo : 27/01/23

Fecha de Emisión de Informe : 30/01/23

N° de Cotización de Servicio : _____



Código del cliente	Color (PCU)
Y001	1015
Y002	380
Y003	1260
Y004	1085
Y005	155
Y006	1060
Y007	835
Y008	280
Y009	1240
Y010	1325

- Lugar y condiciones ambientales del muestreo: Indicado por el cliente
- El cliente renuncia al derecho de la dirimencia

Método de Análisis:

Color: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2120 B, 23rd Ed.2017. Método de comparación visual

Huancayo, 30 de Enero de 2023

 GRUPO JHACC S.A.C.

Ing. Henry R. Ochoa León
 CIP N° 124232
 JEFE DE LABORATORIO

*El informe de ensayo solo es valido para las muestras referidas en el presente informe

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC

*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-GJ

Rev: 01

Jr. Santa Rosa N° 1361 - El Tambo, Huancayo - Perú Celular: 971 718825 - 954 416149 - 956 988682
 Correo: proyectos@grupojhacc.com / administracion@grupojhacc.com
 www.grupojhacc.com

Anexo B. Panel fotográfico del teñido de la lana de llama.





Remojo de la lana de llama



Ebullición de lana de llama con la anilina



Adición de ácido acético



Ebullición durante 2 h



Muestra de las ART



Medición de los parámetros físicos de las ART

Anexo C. Panel fotográfico de fotocatalisis con cobre(II) para la decoración de ART.





Adición de la solución de H_2O_2



ART en tratamiento por la fotocatalisis con cobre(II)

Anexo D. Matriz de consistencia.

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Metodología	
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente		Método	Alcance
¿Es posible decolorar las aguas residuales textiles aplicando el método de fotocátalisis con cobre(II) en el distrito de Hualhuas, Junín?	Aplicar la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.	Si es posible la decoloración por la aplicación de la fotocátalisis con cobre(II) en las aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín	Decoloración de las ART.	Porcentaje de decoloración (%).	Método científico, se identificó el problema, luego se planteó la hipótesis y se contrastó.	Nivel: Explicativo, se manipularon dos variables independientes y se evaluó el efecto en la variable dependiente. Tipo: Aplicada, se usó el conocimiento para mitigar la contaminación generada por las ART mediante el tratamiento de este efluente con fotocátalisis con cobre(II).
Problemas específicos	Objetivos específicos		Variable independiente		Diseño de la investigación	
*¿Cuál es la dosis de cobre(II) y pH de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?	*Determinar la dosis de cobre(II) y pH de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.		Fotocátalisis con cobre(II).	Dosis de cobre(II). pH.	Experimental, diseño factorial, de bloques aleatorizados 3 ² .	
*¿Cuáles son los efectos de la fotocátalisis con cobre(II) en la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?	*Analizar los efectos de la fotocátalisis con cobre(II) en la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.				Población	Muestra
					ART que descargan las empresas textiles del distrito de Hualhuas, Huancayo - Junín. El tamaño de la población cambia por la demanda de las prendas de lana de oveja, llama y otros que elaboran las empresas.	10,8 L de las ART vertidas por las empresas textiles del distrito de Hualhuas, Huancayo - Junín, al cual se aplicó la fotocátalisis con cobre(II). La técnica de muestreo es no probabilística - por conveniencia.
					Técnica de recolección de datos	Análisis e interpretación de los resultados
*¿Cuál es la eficiencia de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín?	*Evaluar la eficiencia de la fotocátalisis con cobre(II) para la decoloración de aguas residuales textiles en el distrito de Hualhuas, Junín.				Experimento, se usó instrumentos para la medición. Las técnicas específicas son la espectroscopía, gravimetría y potenciometría.	Estadística descriptiva y para la prueba de hipótesis se usó el ANOVA de dos variables independientes y tres niveles.