



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Aplicación de Geopolímeros como Catalizadores para la Degradación
Fotocatalítica de las Aguas Residuales de Tinte: Revisión sistemática

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Ambiental

AUTOR:

Monge Porras, Viviana Yumira (ORCID: 0000-0002-3824-0777)

ASESOR:

Dr. Lozano Sulca, Yimi Tom (ORCID: 0000-0002-0803-1261)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo Sostenible y Adaptación al Cambio Climático

LIMA - PERÚ

2022

Dedicatoria

A Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis hijos y padres, por su amor, trabajo, comprensión y sacrificio en todos estos años.

Agradecimientos

A Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a nuestros padres: Por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de gráficos y figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	13
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	13
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	13
3.3. Escenario de estudio	15
3.4. Participantes	15
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	15
3.6. Procedimiento	15
3.7. Rigor científico	17
3.8. Método de análisis de información	17
3.9. Aspectos éticos.....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
V. CONCLUSIONES.....	25
VI. RECOMENDACIONES	26

REFERENCIAS

ANEXOS

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Matriz apriorística</i>	14
Tabla 2. <i>Catalizadores basados en geopolímeros</i>	19
Tabla 3. <i>Condiciones de síntesis de los catalizadores</i>	21
Tabla 4. <i>Degradación fotocatalítica</i>	23

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Procedimiento de recolección de información</i>	16
---	----

Índice de figuras

<i>Figura 1. Etapas principales involucradas en la unidad de procesamiento húmedo de una industria textil</i>	4
<i>Figura 2. Estructura de algunos tintes textiles</i> -----	5
<i>Figura 3. Contaminación ambiental y de salud por las TIWW</i> -----	6
<i>Figura 4. Degradación fotocatalítica de colorantes textiles de las aguas residuales</i> -----	8

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo determinar cuáles son los puntos más resaltantes acerca de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación de aguas residuales; por lo cual realizo la recolección de estudios a nivel mundial ya que se tuvo como metodología de estudio un tipo de investigación aplicada de diseño narrativo. Donde, los resultados obtuvieron que, el catalizador basado en geopolímeros más empleado es el catalizador de geopolímero cargado, seguido de los catalizadores de geopolímero mejorado con carbono, donde, la fabricación de catalizadores basados en geopolímeros cargados implica la preparación del geopolímero y la carga de especies activas, como metales, óxidos metálicos y sales de metales de transición. Las condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros incluyen el metacaolín y algunos residuos sólidos de aluminosilicatos industriales de cenizas volantes, escorias de altos hornos y escorias de acero, tienen relaciones molares de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,0 a 13,01, CaO/SiO_2 de 0,08 a 1,79, y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0,06 a 0,12, y relaciones de masa de $\text{H}_2\text{O}/\text{escoria}$ de 0,27 a 0,38. Por último, la degradación fotocatalítica mejora significativamente con el acoplamiento catalizadores ello debido a los altos porcentajes de degradación que se encuentran superiores al 90%.

Palabras clave: geopolímeros, catalizadores, degradación, fotocatalítica, aguas residuales.

Abstract

The present study had as objective to determine which are the most outstanding points about the application of geopolymers as catalysts for the degradation of wastewater; for which it carried out the collection of studies at world-wide level since it was had as methodology of study a type of applied research of narrative design. Where, the results obtained that, the most employed geopolymer based catalyst is the loaded geopolymer catalyst, followed by carbon enhanced geopolymer catalysts, where, the fabrication of loaded geopolymer based catalysts involves the preparation of the geopolymer and the loading of active species, such as metals, metal oxides and transition metal salts. The synthesis conditions of geopolymer-based catalysts include metakaolin and some solid residues of industrial aluminosilicates from fly ash, blast furnace slag and steel slag, have molar ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ from 1.0 to 13.01, CaO/SiO_2 from 0.08 to 1.79, and $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ from 0.06 to 0.12, and $\text{H}_2\text{O}/\text{slag}$ mass ratios from 0.27 to 0.38. Finally, the photocatalytic degradation is significantly improved with catalytic coupling it due to the high degradation percentages found above 90%.

Key words: geopolymers, catalysts, degradation, photocatalytic, wastewater.

I. INTRODUCCIÓN

Con el continuo progreso de la industrialización y el desarrollo de la sociedad humana, la contaminación ambiental se ha convertido en un problema principal que no sólo provoca el deterioro ecológico, sino que también amenaza la existencia de los seres humanos (Zhang X. et al., 2021, p.1).

Con ello, las aguas residuales e incluso los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) contienen una variedad de microcontaminantes y las concentraciones varían de ng/L a µg/L (Chen Gen et al., 2022, p.1).

Siendo así que, la producción textil es un proceso que demanda agua; se requieren alrededor de 300 L de agua por kilogramo de producto textil terminado y durante el paso de teñido, solo una pequeña porción del tinte se fija en las fibras, mientras que el resto se descarga como agua residual (Pereira A. et al., 2021, p.1). Pero, las industrias textiles juegan un papel importante en la mejora de las economías nacionales en todo el mundo; no obstante, generan una enorme cantidad de efluentes coloreados intensivos, lo que supone una grave amenaza para el medio ambiente (Parmar N. et al., 2019, p.1).

De ahí que la industria textil provoque la generación diaria de una gran cantidad de aguas residuales que requieren tratamiento antes de su vertido al medio ambiente, donde, las aguas residuales producidas se caracterizan por una alta demanda química y biológica de oxígeno (DQO y DBO), incluidos los colorantes empleados en el proceso y una alta concentración de desechos químicos (Fortunato L. et al., 2021, p.1).

Como consecuencia la contaminación ambiental y las sustancias tóxicas producidas por el proceso de fabricación industrial son los principales desafíos que se enfrentan en todo el mundo (Bediako J. et al., 2020, p.3).

A pesar de ello, actualmente se fabrican casi 10 000 tintes sintéticos diferentes, principalmente tintes azoicos, y son utilizados con frecuencia por la industria textil y otras industrias para teñir porque son económicamente más estables que los tintes naturales (Garg S. et al., 2017, p.1). A pesar que estos colorantes químicos son tóxicos y altamente persistentes en el medio ambiente y sus productos metabólicos son de naturaleza mutagénica y cancerígena (Dixit S. y Garg S., 2018, p.1).

Por tal motivo, el tratamiento de la solución de tinte textil se considera uno de los tratamientos de aguas residuales más desafiantes., lo que representa una gran preocupación para el ecosistema (Kumar D. et al., 2019, p.3).

Es así que, para mejorar la eficacia de la eliminación de estos productos farmacéuticos, se han desarrollado varias tecnologías, como la cloración, la irradiación UV, la coagulación-floculación, la adsorción con carbón activado y la filtración por membrana (Yaseen D. y Scholz M., 2019, p.2). Sin embargo, con estas tecnologías, muchos contaminantes siguen sin poder eliminarse por completo, o simplemente se transfieren de una fase a otra (Mashkoor F. et al., 2018, p.1).

Aunque el geopolímero como nuevo material de construcción ha sido ampliamente investigado en los últimos años, la fragilidad esencial aún lo limita como material de construcción comercial para la aplicación en el campo de la ingeniería municipal (Mantovani A. et al., 2017, p.4). Por lo tanto, era urgente que los investigadores exploraran algunos enfoques alternativos, como es el caso de los geopolímeros; los cuales se utilizaron como diversos catalizadores para tratar.

Es así que mediante lo expuesto se plantea el siguiente problema de estudio: ¿Cuáles son los puntos más resaltantes acerca de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación de aguas residuales?

Así mismo, los siguientes problemas específicos:

PE1: ¿Cuál es el catalizador basados en geopolímeros más empleados para la degradación de aguas residuales?

PE2: ¿Cuáles son las condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales?

PE3: ¿Cuál es la degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros?

Así mismo, se planteó el objetivo de estudio: Determinar cuáles son los puntos más resaltantes acerca de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación de aguas residuales.

Y así mismo los tres objetivos específicos siguientes:

OE1: Analizar cuál es el catalizador basados en geopolímeros más empleados para la degradación de aguas residuales

OE2: Analizar cuáles son las condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales

OE3: Determinar cuál es la degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros

Siendo así que el estudio se encuentra enfocado en determinar la importancia de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación fotocatalítica de las aguas residuales de tinte; para lo cual presenta una justificación teórica de estudio, ya que, se va a realizar un estudio sistemático de diversas literaturas, con la finalidad de contribuir a una base de datos actualizada para los futuros investigadores y que puedan ampliar el trabajo llevándolo a estudios prácticos.

II. MARCO TEÓRICO

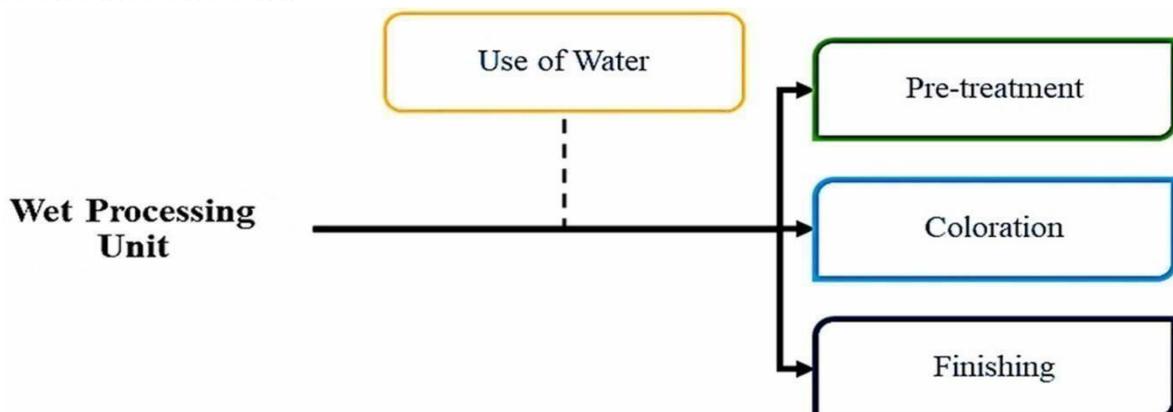
Las industrias textiles juegan un papel importante en la mejora de las economías nacionales en todo el mundo. Incrementándose el uso de tintes sintéticos en la industria textil y de teñido debido a su rentabilidad, alta estabilidad a la luz, temperatura y detergentes, y resistencia al ataque microbiano en comparación con los tintes naturales (Anantharaan K. et al., 2016, p.2).

Actualmente se fabrican casi 10 000 tintes sintéticos diferentes, principalmente tintes azoicos, y son utilizados con frecuencia por la industria textil y otras industrias para teñir porque son económicamente más estables que los tintes naturales (Garg S. y Tripathi M., 2017, p.2).

Pero, las industrias textiles dependen en gran medida del agua durante el procesamiento previo de la materia prima y el teñido y estampado de la tela y, al mismo tiempo, consumen una gran cantidad de productos químicos y pigmentos sintéticos (Agtas M. et al., 2020, p.1). Lo que conlleva a una enorme cantidad de efluentes coloreados intensivos, lo que supone una grave amenaza para el medio ambiente (Garg N. y Anurag M., 2020, p.1).

La instalación con mayor consumo de agua de una industria textil es su unidad de procesamiento húmedo; en esta unidad, el agua se utiliza para teñir, lavar, estampar, terminar y otros procesos según el patrón de producción de la industria, el equipo y la naturaleza de los tintes utilizados. (Ver figura 1).

Figura N°1: Etapas principales involucradas en la unidad de procesamiento húmedo de una industria textil



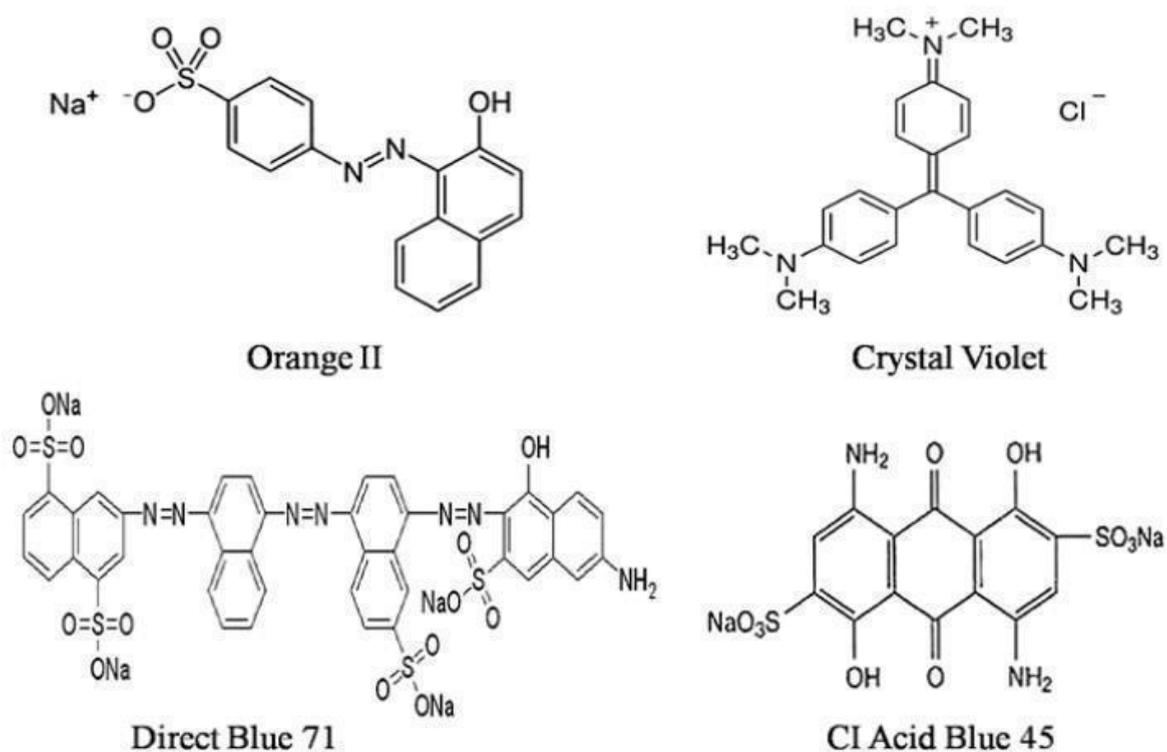
Fuente: Haque Md. Et al., (2021)

Las industrias textiles utilizan agua superficial y subterránea como fuentes principales, en algunos casos, se ha introducido un sistema de recolección de agua de lluvia para el suministro complementario de agua (Chandanshive V. et al., 2020, p.3); y como se observa en la figura 1, son tres las etapas principales involucradas en la unidad de procesamiento húmedo de una industria textil.

El agua se trata principalmente como solvente para el procesamiento de productos químicos, medios de lavado y enjuague, y también se utiliza en intercambio iónico, funcionamiento de calderas, instalaciones de refrigeración, secado con vapor, procesos de prensado y limpieza (Tomei M. et al., 2016, p.2).

Los tintes comprenden una amplia gama de diversas estructuras químicas que se basan en grupos aromáticos y heterocíclicos sustituidos, por ejemplo, amina aromática, fenilo y naftilo (Singh R. et al., 2017, p.1). Entre las distintas clases químicas de colorantes, los colorantes azoicos (entre el 60 y el 70%) son la clase más numerosa, con una considerable diversidad de colores. Los colorantes antraquinónicos son la segunda clase más importante (~15%), seguidos de los colorantes trifenilmetanos (~3%) (ver figura 2).

Figura N°2: Estructura de algunos tintes textiles



Fuente: Singh Rjat P. et al., (2019)

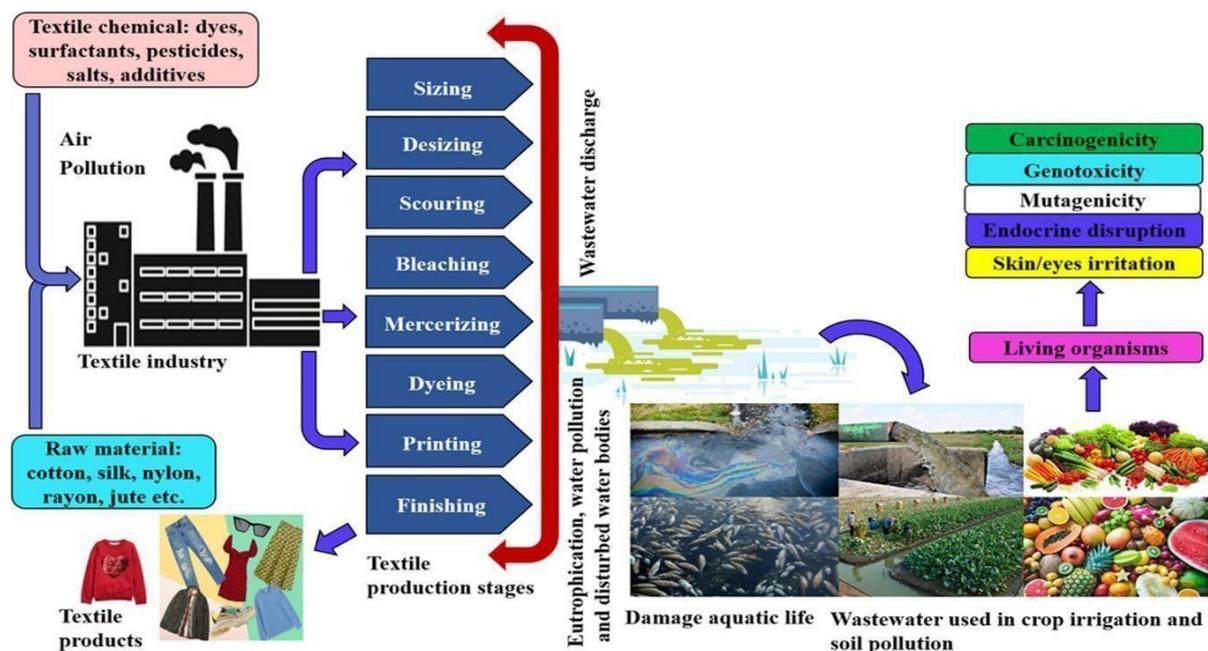
Se observa en la figura 1, tintes que se utilizan ampliamente en la industria textil y son los principales tintes sintéticos conocidos que se vierten al medio ambiente.

Debido a que estos colorantes químicos son tóxicos y altamente persistentes en el medio ambiente y sus productos metabólicos son de naturaleza mutagénica y cancerígena (Agtas M. et al., 2021, p.2).

Los contaminantes generados a partir de varios pasos involucrados en las industrias textiles crean varios problemas ecológicos debido a la generación de una gran cantidad de aguas residuales que contienen contaminantes (Kishor Roop et al., 2021, p.2).

Siendo las aguas residuales de la industria textil (TIWW) consideradas uno de los peores contaminantes de nuestras preciosas ecologías de agua y suelo; pero también, provoca amenazas cancerígenas, mutagénicas, genotóxicas, citotóxicas y alérgicas para los organismos vivos. (como se muestra en la figura 3).

Figura N°3: Contaminación ambiental y de salud por las TIWW



Fuente: Kishor Roop et al., (2021)

Las aguas residuales de la industria textil contienen una variedad de contaminantes colorantes persistentes y colorantes sintéticos, fenoles, formaldehído, ftalatos, tensioactivos, clorofenol y compuestos aromáticos y metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), zinc (Zn) y níquel (Ni), cloruros y sulfatos (Hossain L. Sarker S. et al., 2018, p.1).

Los productos químicos sintéticos, los pigmentos y los tintes se suman a la complejidad de los efluentes y lodos de las aguas residuales, causando daños al medio ambiente (Pazdzior K. et al., 2019, p.3).

También, las TIWW se caracteriza por un alto contenido de colorante, alto pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos disueltos totales (TDS), sólidos suspendidos totales (TSS), carbono orgánico total (COT), cloruros y sulfatos (Leal T. et al., 2018, p.1). Lo que provoca al ser vertidos a cuerpos de agua, que pueden modificar la naturaleza física, química y biológica de los cuerpos de agua receptores (Gupta V. et al., 2016, p.2).

Además, la industria textil es responsable de una extensa lista de impactos ambientales, como la contaminación del aire producida, donde implica, por ejemplo, la liberación de material particulado y polvo, óxidos de nitrógeno y azufre y compuestos orgánicos volátiles (Hall L., 2017, p.5). Los retazos de telas e hilados textiles y los envases desechados constituyen los residuos sólidos primarios (Ngatia S. y Devraj S., 2017, p.3).

Los lodos textiles, por su parte, presentan problemas relacionados con volúmenes excedentes y composición no deseada, presentando muchas veces altas cargas de materia orgánica, micronutrientes, cationes de metales pesados y microorganismos patógenos (Wang D., 2016, p.2).

Los principales daños que provoca la industria textil al medio ambiente, sin embargo, son los derivados de la descarga de efluentes sin tratar a los cuerpos de agua, que normalmente constituyen el 80% del total de emisiones que produce esta industria (Orts D. et al., 2018, p.2).

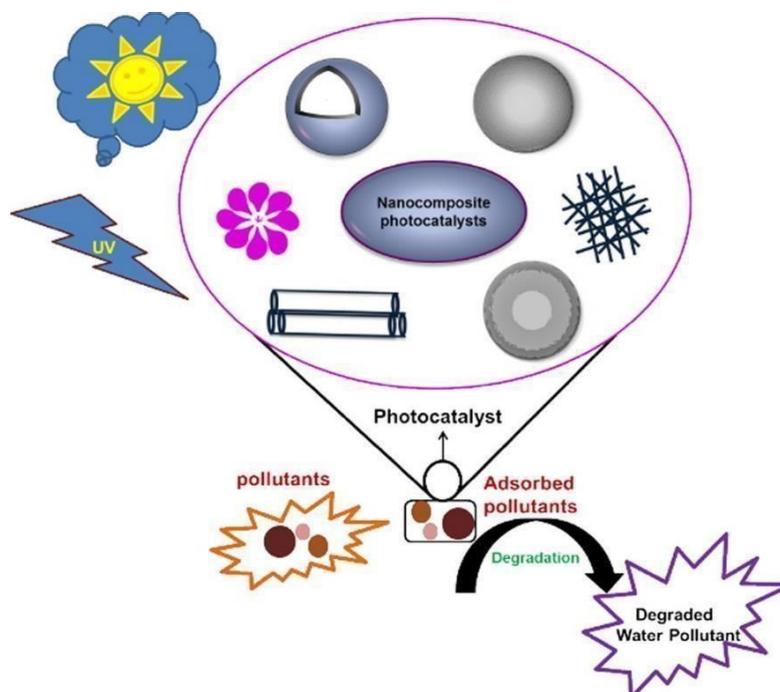
Por lo tanto, comprender las enzimas degradadoras de colorantes azoicos y los genes funcionales es crucial para dilucidar sus mecanismos moleculares para el desarrollo de tecnología de biorremediación eficiente (Sakamoto M. et al., 2019, p.1).

Los métodos de tratamiento convencionales (por ejemplo, los métodos biológicos, la adsorción y los métodos químicos) suelen ser insuficientes para depurar las aguas residuales resultantes de la industria de tintura textil; este tipo de aguas contaminadas suelen ser resistentes al tratamiento biológico convencional (Kaur P. et al., 2018, p.2).

Ante ello, recientemente, los procesos de oxidación avanzada (POA) se han centrado en la eliminación de colorantes de las aguas residuales debido a sus ventajas, como ser ecológicos, económicos y capaces de degradar muchos colorantes o contaminantes orgánicos presentes en el agua (Buthiyappan A. et al., 2019, p.3). Donde, la fotocatalisis es uno de los procesos de oxidación avanzados, llevado a cabo principalmente bajo irradiación de luz y materiales fotocatalíticos adecuados (Ceretta M. et al., 2020, p.1).

Por tanto, la degradación fotocatalítica ha recibido una gran atención como método alternativo para la eliminación de contaminantes orgánicos de las aguas residuales (Natarajan S. et al., 2018, p.1). (Ver figura 4).

Figura N°4: Degradación fotocatalítica de colorantes textiles de las aguas residuales



Fuente: Saidulu D. et al., (2022)

Este método puede reducir los altos niveles de DQO a través de la mineralización de los contaminantes objetivo, la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos por geopolímeros (EL Mekkawi D. et al., 2017, p.1).

La actividad fotocatalítica de los materiales fotocatalíticos depende principalmente de la brecha de banda, el área superficial y la generación de huecos de par de electrones para colorantes de degradación presentes en el agua (Horikoshia y Serpone, 2018).

El área superficial juega un papel importante en la degradación fotocatalítica de los tintes, proporcionando una mayor área superficial, lo que lleva a una mayor adsorción del tinte en la superficie del fotocatalizador y mejora la actividad fotocatalítica.

Se presenta la recopilación de los estudios científicos encontrados a nivel mundial de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación fotocatalítica de las aguas residuales de tinte:

Saputra E. et al., 2018, en su trabajo, el geopolímero se preparó a partir de ceniza de cáscara de arroz (RHA) convertida en silicato de sodio y luego se sintetizó haciendo reaccionar metacaolín, NaOH y agua. El catalizador se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de rayos X de dispersión de energía (EDX), Brunauer Emmet Teller (BET) y resistencia básica. Luego, el catalizador utilizado para la transesterificación del aceite de semilla de *Calophyllum inophyllum* para producir biodiesel. El mayor rendimiento obtenido 87,68% biodiesel con contenido de éster alquílico 99,29%, densidad 866 kg/m³, viscosidad 4,13 mm²/s, el índice de acidez de 0,42 mg-KOH/g de biodiésel y el punto de inflamación 140 °C. En general, las variaciones del % p/p del catalizador proporcionan una influencia dominante en la respuesta del rendimiento del biodiésel.

Kang Le et al., 2016, preparó un nuevo fotocatalizador para la degradación del tinte de las aguas residuales utilizando material mesoporoso a base de escoria de acero activado con álcali (ASSMM) mediante la adición de un agente formador de poros. Los resultados de XRD mostraron que había principalmente fase mineral de hidrato de silicato de calcio (CSH) y lawsonita, (CaAl₂Si₂O₇(OH)₂·H₂O) en las muestras de ASSMM mediante la adición de un agente formador de poros. El resultado del área de superficie específica BET indicó que más del 85 % del volumen de los poros se centralizó principalmente en el rango mesoporoso con un diámetro de poro de 2-50 nm para la muestra (0,1 ASSMM) mediante la adición de un 0,1 % en peso de agente formador de poros.

Alzeer Mohammad et al., 2017, informa sobre la síntesis de polímeros inorgánicos de aluminosilicato jerárquicos (también conocidos como geopolímeros) que contienen sitios ácidos de Bronsted y Lewis que funcionan como una nueva clase de catalizadores ácidos sólidos heterogéneos. Los geopolímeros se sintetizaron a partir de un mineral arcilloso natural mediante un proceso ecológico y de bajo consumo

energético. Los catalizadores basados en geopolímeros lograron una alta actividad catalítica que fue superior a la zeolita enlace sencillo H Y en condiciones de reacción idénticas. Concluyendo mediante los resultados que los geopolímeros tienen un potencial considerable como catalizadores sólidos heterogéneos rentables, fáciles de sintetizar y respetuosos con el medio ambiente para aplicaciones de química fina.

Bendoni R. et al., 2019, Se investigó la actividad de nuevos catalizadores en condiciones reales de gasificación mediante un reactor de doble lecho fijo, a 700, 800 y 900 °C. Se dispersaron polvos de óxidos metálicos, es decir, Fe_2O_3 y Mn_2O_3 , en una matriz de geopolímero, para producir materiales compuestos en forma granular para aplicación en lecho fijo. Además, se produjo un compuesto mixto de Fe/Mn para explorar los efectos combinados de los dos óxidos. Todos los sistemas promovieron una apreciable remoción de alquitrán, mientras que los análisis FE-SEM y MIP demostraron su estabilidad en las condiciones del proceso. Los mejores rendimientos se obtuvieron utilizando el compuesto que incluía óxidos de Mn y Fe, que registró una descomposición del alquitrán de hasta un 86 % en comparación con la arena inerte y un 50 % en comparación con el olivino.

Falah Mahroo et al., 2016, en su trabajo estudió nuevos compuestos fotoactivos para eliminar de manera eficiente los colorantes orgánicos del agua. Estos consisten en nanopartículas de $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ en una nueva matriz de geopolímero inorgánico modificada por una gran especie de amonio terciario (bromuro de cetiltrimetilamonio, CTAB) cuya presencia en la matriz se demuestra mediante espectroscopia FTIR. El CTAB no interrumpe las unidades de sílice y alúmina estructural del geopolímero tetraédrico, como lo demuestra la espectroscopía de RMN de ^{29}Si y ^{27}Al MAS. Las mediciones SEM/EDS, TEM y BET sugieren que el $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ las nanopartículas se distribuyen homogéneamente en la superficie y dentro de los poros del geopolímero. El mecanismo de eliminación del colorante azul de metileno (MB) de la solución consiste en una combinación de adsorción (en condiciones de oscuridad) y fotodegradación (bajo radiación UV). La adsorción de MB en la oscuridad sigue una cinética de pseudo segundo orden y se describe mediante isothermas de tipo Freundlich-Langmuir.

Zhang Yao jun et al., 2017, en su artículo científico el geopolímero a base de cenizas volantes con estructura de poros regulable se sintetizó en primer lugar utilizando urotropina como agente formador de poros. Mientras tanto, un tipo de geopolímero

basado en cenizas volantes cocargado con In_2O_3 y NiO se sintetizó en primer lugar mediante el diseño de acoplamiento de semiconductores. La composición, estructura y propiedades de los catalizadores se caracterizaron por XRF, TG/DSC, FESEM, XRD, FT-IR y UV-Vis. Además, se estudiaron las actividades de degradación de las aguas residuales de teñido simuladas, el mecanismo y la dinámica de reacción. Los resultados indicaron que la estructura de los poros, el área de superficie específica BET y el volumen de mesoporos del geopolímero mejoraron notablemente al agregar un agente formador de poros.

Zhang Yao et al., 2017, se sintetizó y utilizó un geopolímero a base de cenizas volantes (AFAG) nanoestructural activado por álcali mediante semiconductores de óxido bimetálico cocargados de In_2O_3 y NiO como un excelente nanocatalizador para la producción de hidrógeno mediante la división del agua. Los resultados de XRD revelaron que In_2O_3 con un tamaño de partícula promedio de aproximadamente 14 nm y NiO en forma de fase amorfa dispersa en la superficie del soporte AFAG. UV-vis DRS y los espectros de fotoluminiscencia mostraron que la muestra de $5\text{In}_2\text{O}_3$ - NiO/AFAG tiene la respuesta más amplia al espectro de luz solar y el espectro de fotoluminiscencia más débil, respectivamente. El $5\text{In}_2\text{O}_3$ -La muestra de NiO/AFAG exhibe una excelente actividad fotocatalítica de evolución de H_2 de $3180 \mu\text{mol/g}$ bajo la irradiación de una fuente de simulación solar durante 6 h debido a su estructura mesoporosa junto con In_2O_3 y NiO .

Kang Le et al., 2016, en su estudio, el nanocompuesto a base de escoria de acero activado con álcali cargado con CeO_2 dopado con V ($\text{V}-\text{CeO}_2$ -ASSN) como un catalizador novedoso para la degradación fotocatalítica del colorante verde de malaquita se informó en primer lugar. Los resultados de la difracción de rayos X (XRD) demostraron que había principalmente una fase mineral de hidrato de silicato de calcio (CSH) y lawsonita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en la escoria de acero activada con álcali. nanocompuestos, y el tamaño de los cristalitas de CeO_2 está cerca de 20 nm dispersos en la superficie de ASSN. La actividad fotocatalítica del CeO_2 dopado con vanadioEl catalizador de nanocompuesto basado en escoria de acero activado con álcali cargado mostró una alta eficiencia de degradación del tinte verde de malaquita (MG) bajo irradiación de luz ultravioleta, y la tasa de degradación más alta puede alcanzar el 100%.

Zhang Yao et al., 2018, en su investigación sintetizó un compuesto electroconductor de grafeno (GR)/geopolímero a base de cenizas volantes (GR/FAG) mediante el ensamblaje de grafeno en la matriz de geopolímero a base de cenizas volantes activado con álcali por primera vez. Los resultados mostraron que la electroconductividad aumentó 348,8 veces al agregar 1% en peso de GR en FAG. La impedancia electroquímica de 1.0GR/FAG fue mucho menor que la del FAG puro. Las isotermas de adsorción-desorción de N₂ indicaron que el grafeno podría mejorar efectivamente la microestructura y parámetros de poro de FAG. Los resultados de SEM y EDS mostraron que el grafeno en escamas estaba cubierto por geles de geopolímeros amorfos a base de cenizas volantes.

Zhang Yao Jun et al., 2018, en su artículo preparó un novedoso nanocompuesto de escoria de acero activado con álcali de CdO/grafeno (CdO/GASSN) y se utilizó para la degradación fotocatalítica del colorante burdeos rápido directo (DFB). Los resultados de la difracción de rayos X mostraron que el nanocompuesto contenía dos fases minerales, incluido el hidrato de silicato de calcio y el óxido de cadmio, y los tamaños de los cristalitas de CdO en los nanocompuestos estaban en nanoescala (20,3 nm y 25,7 nm). Los resultados de la distribución del tamaño de poro indicaron que alrededor del 80% del volumen de poro se concentró en el rango mesoporoso. Los espectros de reflectancia difusa UV-vis mostraron que la muestra de 8CdO/GASSN poseía la banda prohibida más baja y exhibió la eficiencia de degradación fotocatalítica más alta, cerrando al 100 % bajo la irradiación de UV durante 100 min.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Este estudio utiliza un tipo de investigación aplicada; debido a que, utilizó y empleó el conocimiento existente de una o varias campos científicos para resolver una problemática que se busca solucionar o esclarecer. Además, este tipo implica el diseño, la implementación y la prueba de sistemas el cual puede utilizar ciertamente rigores experimentales, pero en su mayoría se encuentra enfocado en entender cuál es el funcionamiento o metodología de un sistema (Edgar T. y Manz D., 2017, p.1). Es así que buscó resolver la problemática de estudio ¿Cuáles son los puntos más resaltantes acerca de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación de aguas residuales?, en base a la información obtenida de los conocimientos existentes de otros estudios ya realizados.

Por otro lado, el diseño de investigación usado fue la narrativa de tópico; debido a que este diseño recopila y estudia la información descrita por los autores que intervinieron en tales sucesos, para a través del procesamiento y entendimientos contarlos en forma de relato a los investigadores; describiendo sus experiencias vividas (Overcash J., 2003, p.1).

Es así que este diseño fue usado, ya que se analizaron las metodologías y procedimientos experimentales que obtuvieron otros investigadores en la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación fotocatalítica de las aguas residuales de tinte; permitiendo así determinar la efectividad e importancia de los geopolímeros como catalizadores.

3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Tabla N°1: Matriz apriorística

PROBLEMAS ESPECÍFICO	OBJETIVO ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	UNIDAD DE ANÁLISIS
¿cuál es el catalizador basado en geopolímeros más empleados para la degradación de aguas residuales?	Analizar cuál es el catalizador basado en geopolímeros más empleados para la degradación de aguas residuales	Catalizadores basados en geopolímeros	Catalizador de geopolímero de intercambio iónico Catalizador geopolímero cargado Catalizador de geopolímero mejorado con carbono catalizador	(Orts D. et al., 2018, p.2), (Wang D., 2016, p.2), (Hossain L. Sarker S. et al., 2018, p.1).
¿cuáles son las condiciones de los catalizadores basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales?	Analizar cuáles son las condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales	Condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros	Material precursor Material activador	(Hall L., 2017, p.5), (Gupta V. et al., 2016, p.2), (Buthiyappan A. et al., 2019, p.3).
¿cuál es la degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros?	Determinar cuál es la degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros	Degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes	En base a la tasa de degradación (%) En base a la concentración de colorante (mol/L)	(EL Mekkawi D. et al., 2017, p.1), (Agtas M. et al., 2021, p.2), (Kishor Roop et al., 2021, p.2).

3.3. Escenario de estudio

El escenario de estudio al ser una revisión sistemática, ha considerado como escenario de estudio a los lugares donde se tomaron muestras de aguas residuales y se realizaron los estudios por los autores, como laboratorios, centros de universidades, entre otros, donde se hayan llevado a cabo las aplicaciones de geopolímeros como catalizadores para la degradación fotocatalítica de las aguas residuales de tinte.

3.4. Participantes

Los participantes de este estudio que permitieron la extracción de artículos científicos fueron portales web y páginas institucionales como: Scielo, Scopus y Sciencedirect.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

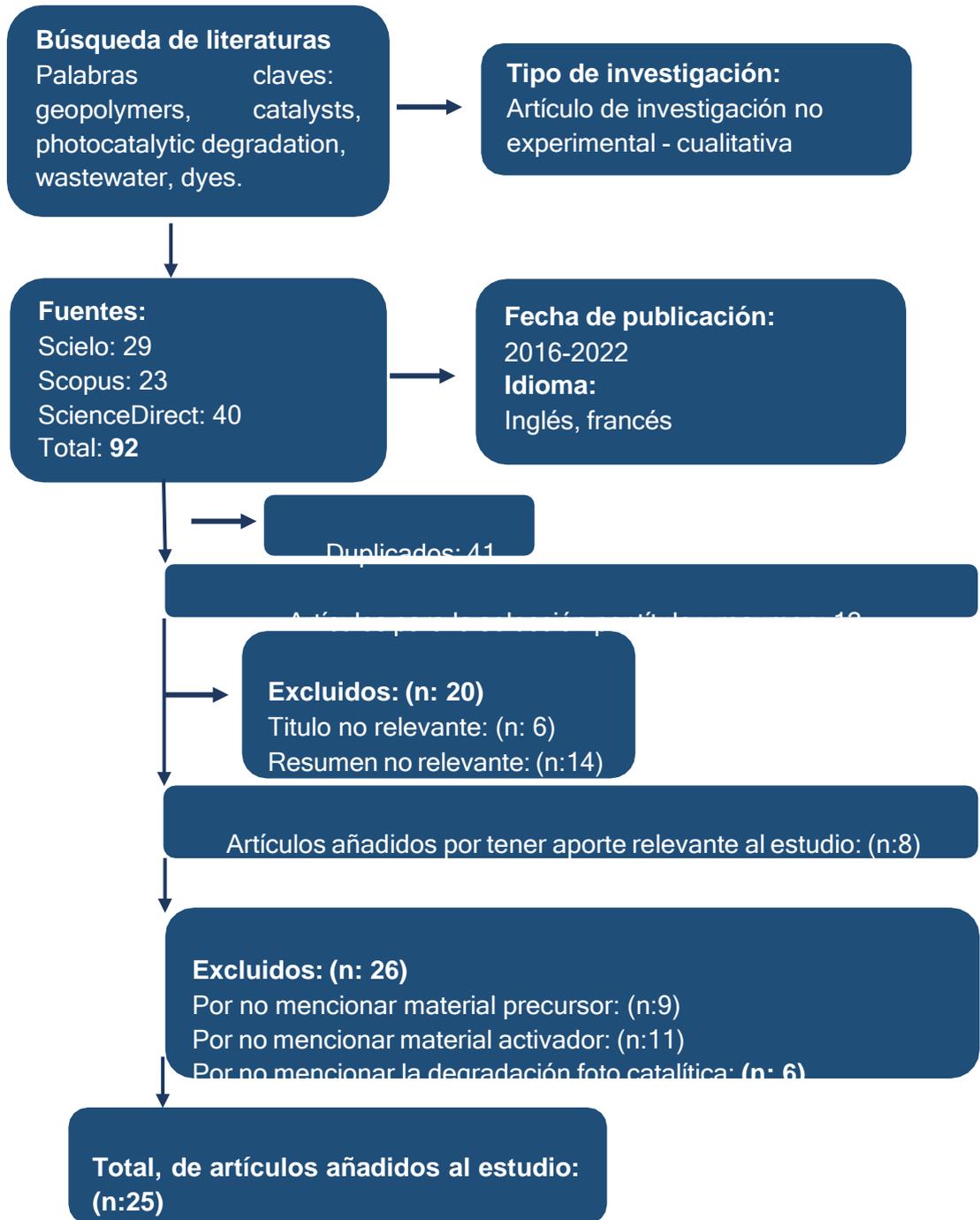
La técnica usada fue el análisis documental, mientras que este se llevó a cabo usando la ficha de análisis como instrumento de recolección de datos.

Siendo considerado el análisis documental como una técnica que permite revisar, estudiar y analizar estudios para extraer y sintetizar la información más relevante y que permita su fácil acceso; ello mediante el uso de la ficha de análisis documental, el cual es una hoja y/o documento que contempla la información resaltante de un documento original (Fereday J. y Muir E., 2006, p.1).

3.6. Procedimiento

El presente trabajo emplea un procedimiento en el cual se tomaron en cuenta únicamente los artículos científicos, donde estos para ser añadidos al estudio pasaron por diversos filtros de adición y exclusión, como el año de antigüedad, los portales web, entre otros; detallándose en el gráfico 1 el procedimiento seguido.

Gráfico N°1: Procedimiento de recolección de información



Elaboración propia

3.7. Rigor científico

El trabajo contó con 4 criterios científicos que permitieron brindar el rigor científico y con el mismo el rigor intelectual del estudio, asegurando la calidad del estudio. Dicho ello, se menciona a continuación los 4 rigores con los cuales cumplió el estudio:

- **Credibilidad:** Es el como la información de un estudio es verdadero para los participantes y para cualquier personaje que haya intervenido en dicho estudio (Salgado, A, 2007 p. 74). Esto se obtiene regresando al estudio, ratificando lo leído para confirmar lo leído y los datos obtenidos de los hallazgos.
- **La confiabilidad:** Este criterio designa la medición de lo confiable, es decir, que los resultados de un estudio sean exactos y verdaderos, ya sea desde diferentes situaciones (Shenton, 2004, p.1). Este criterio se obtiene en diferentes etapas de la investigación, mediante la interpretación de los análisis.
- **La transferibilidad:** Este criterio permite determinar si se puede transferir la información de un estudio hacia otros contextos y este es determinado por el lector del informe (Paudyal V., 2018, p.4). Este criterio se obtuvo dejando la mayor información a lo largo de la investigación para que de tal forma los lectores puedan tener acceso al estudio y puedan ahondar más en el tema aplicándolo en nuevos estudios.
- **Confirmabilidad:** Este criterio hace referencia a la neutralidad del contenido de la investigación y que tan factible es que otros investigadores puedan continuar con las pistas dejadas para llegar a resultados similares (Paudyal V., 2018, p.4). Este criterio se obtiene dejando información precisa, como las referencias de cada cita en las cuales los investigadores puedan ingresar y llegar al inicio de la información extraída.

3.8. Método de análisis de información

El método usado como análisis de la información fue elegido en base a la realidad problemática, siendo el principal objetivo determinar cuáles son los puntos más resaltantes acerca de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación de aguas residuales; planteando los objetivos: Analizar cuál es el catalizador basado en geopolímeros más empleados para la degradación de aguas residuales, Analizar cuáles son las condiciones de síntesis de los catalizadores

basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales y Determinar cuál es la degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros. Para ello se usó el método de triangulación, ya que fue necesario dos técnicas como el análisis documental y la matriz apriorística; siendo las categorías y sub categorías quienes permitieron que los resultados alcanzados sean precisos y ordenados.

Categorías: Catalizadores basados en geopolímeros / Condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros / Degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes.

Sub categorías: Catalizador de geopolímero de intercambio iónico, Catalizador geopolímero cargado, Catalizador de geopolímero mejorado con carbono catalizador; Material precursor, Material activador; En base a la tasa de degradación (%), En base a la concentración de colorante (mol/L).

3.9. Aspectos éticos

El presente trabajo buscó cumplir con los aspectos éticos mediante los criterios del rigor científico, cumplimiento a la resolución rectoral N° 0089-2019 estipulado por la Universidad Cesar Vallejo, el lineamiento de la guía de productos observables y el debido citando de los autores utilizados siguiendo la norma ISO 690-2.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a la búsqueda del objetivo principal del estudio en determinar cuáles son los puntos más resaltantes acerca de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación de aguas residuales; se realizó la tabla 2, en la cual se analizaron los catalizadores basados en geopolímeros más empleados para la degradación de aguas residuales.

Tabla N°2: Catalizadores basados en geopolímeros

Catalizador	Material precursor	Activador	Fuente
Catalizador de geopolímeros	metacaolín	Na ₂ SiO ₃ , NaOH	Saputr E. et al., 2018
	escoria de acero	NaOH	Kang Le et al., 2016
Catalizador de geopolímero de intercambio iónico	halloysita	NaOH, KOH	Alzeer M. et al., 2017
Catalizador de geopolímero cargado	metacaolín	NaOH, Na ₂ SiO ₃	Candamano S. et al., 2016
	metacaolín	KOH	Sharma S. et al., 2016
	metacaolín	KOH	Bendon R. et al., 2019
	arcilla halloysita	NaOH, Na ₂ SiO ₃	Falah M. et al., 2016
	cenizas volantes	Na ₂ SiO ₃ , 9H ₂ O KOH	Zhang Yao J. et al., 2017
	escoria de alto horno	NaOH	Zhang Yao J. et al., 2016
	escoria de acero	NaOH	Kang Le et al., 2016
	escoria de magnesio	Na ₂ SiO ₃ , 9H ₂ O	Zhang Yao Jun et al., 2016
Catalizador de geopolímero mejorado con carbono	Ceniza voladora	KOH, Na ₂ SiO ₃	Zhang Yao J. et al., 2018
	cenizas de fondo	Na ₂ SiO ₃	Zhang et al., 2017
	escoria de acero	NaOH	Zhang Yao Yun et al., 2018
	escoria granulada de alto horno	NaOH	Zhang Y.J et al., 2018
	escoria de silicomanganeso	NaOH	Zhang Y. et al., 2018

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 2, el catalizador basado en geopolímeros más empleados para la degradación de aguas residuales es el catalizador de geopolímero cargado, siendo demostrado por: Candamano S. et al., 2016, Sharma S. et al., 2016, Bendoni R. et al., 2019, Falah M. et al., 2016, Zhang Yao J. et al., 2017, Zhang Yao J. et al., 2016, Kang Le et al., 2016, Zhang Yao Jun et al., 2016. Seguido de los catalizadores de geopolímero mejorado con carbono; Zhang Yao J. et al., 2018, Zhang et al., 2017, Zhang Yao Yun et al., 2018, Zhang Y.J et al., 2018, Zhang Y. et al., 2018.

Siendo la fabricación de catalizadores basados en geopolímeros cargados implica la preparación del geopolímero y la carga de especies activas, como metales, óxidos metálicos y sales de metales de transición, mientras que la carga de especies activas incluye tanto la mezcla de especies activas con el precursor durante la fabricación del geopolímero, como la carga de especies activas después de la fabricación del geopolímero.

Además, entre los geopolímeros cargados con mayor frecuencia se encuentra el metacaolín; así lo corrobora Candamano S. et al., 2016 y Sharma S. et al., 2016; quienes utilizaron metacaolín con NaOH, Na₂SiO₃ y KOH como activadores respectivamente.

Respaldando los resultados presentados de la comparación de diversas literaturas Bendoni et al. (2019), fabricó en su estudio un catalizador de geopolímero a base de Fe₂O₃eMn₂O₃/metacaolina (Fe₂O₃eMn₂O₃/MG) con una distribución de tamaños de 0,2 a 0,3 mm añadiendo los polvos de Fe₂O₃ y Mn₂O₃ a la lechada de MG mediante los procesos de curado y trituración.

Al igual que el estudio anterior Fallah M. et al. (2016, p.2), presenta respaldo con su estudio, donde sintetizó el Cu₂O cúbico nanoestructurado por el método de precipitación y luego lo añadieron a la lechada de geopolímero para preparar un geopolímero a base de arcilla de Cu₂O/halloysita arcilla (Cu₂O/HCG) después de curar a temperatura ambiente durante 12 y molido finamente.

Pero ello es refutado por los estudios de Zhang Yao J. et al., 2018, Zhang et al., 2017, Zhang Yao Yun et al., 2018, Zhang Y.J et al., 2018, Zhang Y. et al., 2018 quienes usaron el catalizador de geopolímero mejorado con carbono. Siendo que los catalizadores de geopolímeros mejorados con carbono se relacionan con los catalizadores de geopolímeros mejorados con grafeno y carbón negro.

Es así que Zhang et al. (2018) informó sobre un catalizador de geopolímero basado en grafeno/cenizas volantes (GR/FAG) y la utilización del método de cuatro electrodos para medir el electro conductibilidad del GR/FAG a granel.

Por otro lado, se buscó también analizar las condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales, mostrando los resultados en la tabla 3.

Tabla N°3: Condiciones de síntesis de los catalizadores

Catalizador	Material precursor	Activador	Relación molar			Fuente
			SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/SiO	Na ₂ O(K ₂ O)/SiO ₂	
Catalizador de geopolímeros	metacaolín	Na ₂ SiO ₃ , NaOH	-	-	-	Saputra E. et al., 2018
	escoria de acero	NaOH	13.01	1.79	0.12	Kang Le et al., 2016
Catalizador de geopolímero de intercambio iónico	halloysita	NaOH, KOH	3.5e7.6	-	1.26 (1.11)	Alzeer M. et al., 2017
Catalizador de geopolímero cargado	metacaolín	NaOH, Na ₂ SiO ₃	2.81	-	0.27	Candama no S. et al., 2016
	metacaolín	KOH	1.00	-	0.50	Sharma S. et al., 2016
	metacaolín	KOH	4.00	-	0.50	Bendoni R. et al., 2019
	arcilla halloysita	NaOH, Na ₂ SiO ₃	2.91	-	0.34	Falah M. et al., 2016
	cenizas volantes	Na ₂ SiO ₃ .9H ₂ O, KOH	2.75	0.08	0.08 (0.08)	Zhang Yao J. et al., 2017
	escoria alto horno	NaOH	4.26	1.33	0.10	Zhang Yao J. et al., 2016
	escoria de acero	NaOH	9.98	1.37	0.11	Kang Le et al., 2016
	escoria de magnesio	Na ₂ SiO ₃ .9H ₂ O	29.94	1.72	0.07	Zhang Yao Jun

						et al., 2016
Catalizador de geopolímero mejorado con carbono	Ceniza voladora	KOH, Na ₂ SiO ₃	2.92	0.09	0.07 (0.16)	Zhang Yao J. et al., 2018
	cenizas fondo	de Na ₂ SiO ₃	4.25	0.17	0.09	Zhang et al., 2017
	escoria acero	de NaOH	13.56	1.71	0.13	Zhang Yao Yun et al., 2018
	escoria granulada de alto horno	NaOH	4.06	1.30	0.09	Zhang Y.J et al., 2018
	escoria de silicomanganeso	de NaOH	2.61	0.83	0.12	Zhang Y. et al., 2018

Elaboración propia

Las condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales se resumen en la tabla 3, donde los precursores, que incluyen el metacaolín y algunos residuos sólidos de aluminosilicatos industriales de cenizas volantes, escorias de altos hornos y escorias de acero, tienen relaciones molares de SiO₂/Al₂O₃ de 1,0 a 13,01, CaO/SiO₂ de 0,08 a 1,79, y Na₂O/SiO₂ de 0,06 a 0,12, y relaciones de masa de H₂O/escoria de 0,27 a 0,38.

Además, los activadores alcalinos son Na₂SiO₃ y NaOH y ello es corroborado por los estudios de Saputra E. et al., 2018, Kang Le et al., 2016, Alzeer M. et al., 2017, Candamano S. et al., 2016, Zhang Yao J. et al., 2016, Kang Le et al., 2016, Zhang Yao Yun et al., 2018, Zhang Y.J et al., 2018 y Zhang Y. et al., 2018.

Así mismo, presentando cierto respaldo a los resultados anteriores, Falah M. et al., (2016), afirma que la preparación de los catalizadores geopolímeros es sencilla y las condiciones de síntesis son bastante suaves; sin embargo, la variedad de catalizadores de geopolímeros es muy limitada.

Por otro lado, en la tabla 4, se buscó determinar la degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros; para lo cual se enfocó en detallar la concentración del colorante y la tasa de degradación.

Tabla N°4: Degradación fotocatalítica

Catalizador	Concentración del catalizador (g/L)	Tipo de colorante	Concentración de colorante (mol/L)	Tasa de degradación (%)	Autor (es)
Cu₂OeTiO₂/HCG	1	MB	1 x 10 ³	97	Falah Mahroo et al., (2016)
In₂O₃eNiO/FAG	0.5	MGC	1.21 x 10 ⁵	95.65	Zhang Yao Jun et al., (2017)
GR/FAG	1	IC	2.14 x 10 ⁵	90.2	Zhang Yao J. et al., (2018)
Co₂p-Fe₂O₃/GAFG	0.5	BB	2.03 x 10 ⁵	91.55	Zhang et al., (2017)
Mn₂p-CuO/GBAG	4	DSB5	2.01 x 10 ⁵	100	Zhang Yao J. et al., (2017)
CaWO₄/GBFSG	4	BV5	9.80 x 10 ⁶	90.29	Zhang Y. et al., (2017)
VeCeO₂-ASSN	1	MGC	2.19 x 10 ⁵	100	Kang Le et al., (2016)
CdO/GR/SSG	2	DFB	3.62 x 10 ⁵	100	Zhang Y.J et al., (2018)
(NiOeCuO)/AMS NC	3	IC	1.07 x 10 ⁴	100	Zhang Yao Jun et al., (2016)
CB/SMSG	8	BV5	9.80 x 10 ⁶	88.3	Zhang et al., (2018)
CaMoO₄/EGC	4	BV5	1.47 x 10 ⁵	99.96	He Pan Y. et al., (2019)

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 4, se tiene que la degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros mejora significativamente con el acoplamiento catalizadores ello debido a los altos porcentajes de degradación que se encuentran superiores al 90%.

Ello es corroborado por Gusain R. et al., (2019, p.2), quien menciona que la degradación fotocatalítica es ampliamente aceptada como una de las técnicas más prometedoras para la eliminación de colorantes orgánicos de las aguas residuales

contaminadas, ya que posee muchas ventajas competitivas, como la de ser "verde", la energía solar inagotable como fuerza motriz y la alta eficiencia.

Así también se tiene de acuerdo a la tabla 4 que son varios los geopolímeros que han sido utilizados como catalizadores o soportes para la degradación fotocatalítica de aguas residuales.

Así mismo lo confirma Falah Mahroo et al., (2016), quien utilizó el catalizador $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2/\text{HCG}$ con una concentración de 1 g/L para degradar el colorante azul de metileno (MB) encontrando una tasa de degradación del 97%; afirmando que la actividad catalítica mejoró significativamente con el acoplamiento del Cu_2O con la titania.

Así también lo apoya Zhang Yao J. et al., (2017), utilizando el catalizador $\text{Mn}_2\text{p-CuO}/\text{GBAG}$, y mediante sus resultados menciona que usando el para eliminar el DSB5 con una concentración de colorante de 2.01×10^5 , logrando eliminar el 100%.

Por otro lado, el FAG se empleó para la degradación de las aguas residuales del tinte azul de metileno (MB); donde la tasa de degradación del colorante MB fue de hasta el 92,79% durante 200 minutos cuando la concentración del colorante MB fue de 4,01106 mol/L, el volumen de solución acuosa fue de 100 mL y el catalizador geopolímero fue de 0,2 g (Zhang y Liu, 2015, p.1).

Además, se informó de que el geopolímero basado en cenizas volantes cocargado con In_2O_3 y NiO ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{NiO}/\text{FAG}$) era el catalizador para la eliminación fotocatalítica del colorante bajo irradiación ultravioleta (Zhang et al., 2017). Mientras que, presentando sierto respaldo, Zhang Yao Jun et al., (2017) en la tabla 4, señala que el catalizador con un 5% de In_2O_3 y un 1% de NiO exhibió la tasa de degradación más alta del 95,65% para el colorante verde magenta (MGC) debido al acoplamiento de la unión p-n de In_2O_3 y NiO , así como a las fuertes acciones del In_2O_3 activo, NiO y el portador de FAG.

Es así que Zhang et al. (2018) informó sobre un catalizador de geopolímero basado en grafeno/cenizas volantes (GR/FAG) y la utilización del método de cuatro electrodos para medir la electroconductibilidad del GR/FAG a gran y los resultados manifestaron que la electroconductividad de la muestra 1 GR/FAG fue aproximadamente 348,8 veces mayor que la de FAG debido al grafeno como un fuerte aceptor de electrones.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los estudios analizados buscando determinar los puntos más resaltantes acerca de la aplicación de geopolímeros como catalizadores para la degradación de aguas residuales, se pudo concluir que se vienen prestando cada vez más atención al diseño y fabricación de diferentes tipos de catalizadores basados en geopolímeros debido a su bajo costo, alta estabilidad, reutilización y excelente actividad catalítica; en particular, la utilización de diversos residuos sólidos industriales, como las cenizas volantes, las escorias granuladas de alto horno, las escorias de acero, las escorias de magnesio y las escorias de silico-manganeso, como materiales de partida para sintetizar los catalizadores basados en geopolímeros; así mismo se detallan en los siguientes puntos las conclusiones de los problemas específicos desarrollados:

El catalizador basado en geopolímeros más empleado es el catalizador de geopolímero cargado, seguido de los catalizadores de geopolímero mejorado con carbono. Siendo la fabricación de catalizadores basados en geopolímeros cargados implica la preparación del geopolímero y la carga de especies activas, como metales, óxidos metálicos y sales de metales de transición, mientras que la carga de especies activas incluye tanto la mezcla de especies activas con el precursor durante la fabricación del geopolímero, como la carga de especies activas después de la fabricación del geopolímero.

Las condiciones de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros para la degradación de aguas residuales incluyen el metacaolín y algunos residuos sólidos de aluminosilicatos industriales de cenizas volantes, escorias de altos hornos y escorias de acero, tienen relaciones molares de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,0 a 13,01, CaO/SiO_2 de 0,08 a 1,79, y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0,06 a 0,12, y relaciones de masa de $\text{H}_2\text{O}/\text{escoria}$ de 0,27 a 0,38. Además, los activadores alcalinos son Na_2SiO_3 y NaOH .

La degradación fotocatalítica de aguas residuales de colorantes empleando diferentes catalizadores basados en geopolímeros mejora significativamente con el acoplamiento catalizadores ello debido a los altos porcentajes de degradación que se encuentran superiores al 90%. Así también se tiene que son varios los geopolímeros que han sido utilizados como catalizadores o soportes para la degradación fotocatalítica de aguas residuales.

VI. RECOMENDACIONES

De acuerdo a la búsqueda realizada y los estudios analizados se puede recomendar a los futuros investigadores realizar mayor interés los geopolímeros como catalizadores para la degradación fotocatalítica; ya que, existen escasos estudios con tal enfoque; así mismo se realizan las siguientes recomendaciones a los futuros investigadores:

En vista de que los enfoques de síntesis de los catalizadores basados en geopolímeros son relativamente sencillos en la actualidad, deberían desarrollarse algunos métodos nuevos, por ejemplo, la activación ácida y la activación híbrida, para preparar catalizadores basados en geopolímeros.

Para explorar el mecanismo catalítico, deberían adoptarse algunas herramientas avanzadas para caracterizar la morfología, la composición y la microestructura de los catalizadores basados en geopolímeros.

Para acelerar las aplicaciones de los catalizadores basados en geopolímeros en la gestión ambiental práctica, es urgente que los investigadores establezcan alguna especificación técnica o norma industrial sobre los catalizadores a base de geopolímeros.

REFERENCIAS

AĞTAŞ, Meltem, et al. Hot water recovery and reuse in textile sector with pilot scale ceramic ultrafiltration/nanofiltration membrane system. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 256, p. 120359. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120359>

AĞTAŞ, Meltem, et al. Pilot-scale ceramic ultrafiltration/nanofiltration membrane system application for caustic recovery and reuse in textile sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, p. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13588-0>

ALZEER, Mohammad IM; MACKENZIE, Kenneth JD; KEYZERS, Robert A. Facile synthesis of new hierarchical aluminosilicate inorganic polymer solid acids and their catalytic performance in alkylation reactions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, vol. 241, p. 316-325. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.12.018>

ANANTHARAMAN, Karthik, et al. Thousands of microbial genomes shed light on interconnected biogeochemical processes in an aquifer system. *Nature communications*, 2016, vol. 7, no 1, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/ncomms13219>

BENDONI, R., et al. Geopolymer composites for the catalytic cleaning of tar in biomass-derived gas. *Renewable Energy*, 2019, vol. 131, p. 1107-1116. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.067>

BHATIA, S. C.; DEVRAJ, Sarvesh. Pollution control in textile industry. WPI Publishing, 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/9781315148588>

BUTHIYAPPAN, Archina, et al. Textile wastewater treatment efficiency by Fenton oxidation with integration of membrane separation system. *Chemical Engineering Communications*, 2019, vol. 206, no 4, p. 541-557. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1508021>

BEDIAKO, John Kwame, et al. Evaluation of orange peel-derived activated carbons for treatment of dye-contaminated wastewater tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, no 1, p. 1053-1068. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07031-8>

BENDONI, R., et al. Geopolymer composites for the catalytic cleaning of tar in biomass-derived gas. *Renewable Energy*, 2019, vol. 131, p. 1107-1116. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.067>

CANDAMANO, S., et al. Preparation and characterization of active Ni-supported catalyst for syngas production. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 96, p. 78-86. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.02.011>

CERETTA, María Belén, et al. Biological degradation coupled to photocatalysis by ZnO/polypyrrole composite for the treatment of real textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, vol. 35, p. 101230. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101230>

CHANDANSHIVE, Vishal, et al. In situ textile wastewater treatment in high rate transpiration system furrows planted with aquatic macrophytes and floating phytobeds. *Chemosphere*, 2020, vol. 252, p. 126513. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126513>

CHEN, Gen-Qiang, et al. Pretreatment for alleviation of RO membrane fouling in dyeing wastewater reclamation. *Chemosphere*, 2022, vol. 292, p. 133471. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133471>

DIXIT, Shweta; GARG, Sanjeev. Biodegradation of environmentally hazardous azo dyes and aromatic amines using *Klebsiella pneumoniae*. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, vol. 144, no 6, p. 04018035. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001353)

EL-MEKKAWI, Doaa M., et al. Preparation and characterization of nano titanium dioxide photocatalysts via sol gel method over narrow ranges of

varying parameters. Oriental journal of chemistry, 2017, vol. 33, no 1, p. 41.
ISSN: 0970-020 X

FALAH, Mahroo, et al. New composites of nanoparticle Cu (I) oxide and titania in a novel inorganic polymer (geopolymer) matrix for destruction of dyes and hazardous organic pollutants. Journal of hazardous materials, 2016, vol. 318, p. 772-782. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.016>

FALLAH, Mahroo, et al. Novel photoactive inorganic polymer composites of inorganic polymers with copper (I) oxide nanoparticles. Journal of materials science, 2016, vol. 50, no 22, p. 7374-7383. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9295-3>

FORTUNATO, Luca, et al. Textile dye wastewater treatment by direct contact membrane distillation: Membrane performance and detailed fouling analysis. Journal of Membrane Science, 2021, vol. 636, p. 119552. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119552>

GARG, Neha; GARG, Anurag; MUKHERJI, Suparna. Eco-friendly decolorization and degradation of reactive yellow 145 textile dye by *Pseudomonas aeruginosa* and *Thiosphaera pantotropha*. Journal of environmental management, 2020, vol. 263, p. 110383. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110383>

GARG, Satyendra Kumar; TRIPATHI, Manikant. Microbial strategies for discoloration and detoxification of azo dyes from textile effluents. Research Journal of Microbiology, 2017, vol. 12, no 1, p. 1-19. Disponible en: <https://doi.org/10.3923/jm.2017.1.19>

GUPTA, V. K., et al. Decolorization of mixture of dyes: A critical review. 2016. ISSN 2383 - 3572

GUSAIN, Rashi, et al. Adsorptive removal and photocatalytic degradation of organic pollutants using metal oxides and their composites: A comprehensive review. Advances in colloid and interface science, 2019, vol. 272, p. 102009. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102009>

HALL, Lincoln W. I. Introduction. University of Pennsylvania Press, 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.9783/9781512816570-002>

HAQUE, Md Sazzadul; NAHAR, Nazmun; SAYEM, Sayed Md. Industrial water management and sustainability: Development of SIWP tool for textile industries of Bangladesh. Water Resources and Industry, 2021, vol. 25, p. 100145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145>

HE, Pan Yang, et al. Development of an eco-efficient CaMoO₄/electroconductive geopolymer composite for recycling silicomanganese slag and degradation of dye wastewater. Journal of Cleaner Production, 2019, vol. 208, p. 1476-1487. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.176>

HOSSAIN, Laila; SARKER, Sumit Kanti; KHAN, Mohidus Samad. Evaluation of present and future wastewater impacts of textile dyeing industries in Bangladesh. Environmental Development, 2018, vol. 26, p. 23-33. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.005>

KANG, Le, et al. A novel V-doped CeO₂ loaded alkali-activated steel slag- based nanocomposite for photocatalytic degradation of malachite green. Integrated Ferroelectrics, 2016, vol. 170, no 1, p. 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10584587.2016.1165572>

KANG, Le, et al. Alkali-activated steel slag-based mesoporous material as a new photocatalyst for degradation of dye from wastewater. Integrated Ferroelectrics, 2015, vol. 162, no 1, p. 8-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10584587.2015.1037197>

KISHOR, Roop, et al. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, p. 105012. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>

Kumar, Dinesh, et al. "Perspectivas, alcance, avances y desafíos de las tecnologías microbianas para el tratamiento de efluentes de la industria textil".

Tratamiento Microbiano de Aguas Residuales. Elsevier, 2019. 237-260.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816809-7.00011-7>

KAUR, Parminder; KUSHWAHA, Jai Prakash; SANGAL, Vikas Kumar. Electrocatalytic oxidative treatment of real textile wastewater in continuous reactor: degradation pathway and disposability study. *Journal of hazardous materials*, 2018, vol. 346, p. 242-252. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.044>

LEAL, Tarcisio W., et al. Textile wastewater treatment using low-cost adsorbent aiming the water reuse in dyeing process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, no 2, p. 2705-2712. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.008>

MANTOVANI, Andrea; TAROLA, Ornella; VERGARI, Cecilia. End-of-pipe or cleaner production? How to go green in presence of income inequality and pro-environmental behavior. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 160, p. 71-82. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.110>

MASHKOOR, Fouzia, et al. Exploring the reusability of synthetically contaminated wastewater containing crystal violet dye using tectona grandis sawdust as a very low-cost adsorbent. *Scientific reports*, 2018, vol. 8, no 1, p. 1-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26655-3>

NATARAJAN, Subramanian; BAJAJ, Hari C.; TAYADE, Rajesh J. Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, vol. 65, p. 201-222. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.03.011>

ORTS, F., et al. Electrochemical treatment of real textile wastewater: Trichromy Procion HEXL®. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, vol. 808, p. 387-394. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.06.051>

PARMAR, Neha D., et al. Decolourization of dye wastewater by microbial methods-A review. *Indian Journal of Chemical Technology (IJCT)*, 2019, vol. 25, no 4, p. 315-323. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/327800368> Decolourization of dye wastewater by microbial methods- A review

PAŹDZIOR, Katarzyna; BILIŃSKA, Lucyna; LEDAKOWICZ, Stanisław. A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 376, p. 120597. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.057>

PEREIRA, Antonio GB, et al. Recent advances on composite hydrogels designed for the remediation of dye-contaminated water and wastewater: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 284, p. 124703. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124703>

SINGH, Rajat Pratap, et al. Present status of biodegradation of textile dyes. *Current Trends in Biomedical Engineering & Biosciences*, 2017, vol. 3, no 4, p. 66-68. Disponible en: <https://doi.org/10.19080/CTBEB.2017.03.555618>

SAIDULU, Duduku; SRIVASTAVA, Ashish; GUPTA, Ashok Kumar. Enhancement of wastewater treatment performance using 3D printed structures: A major focus on material composition, performance, challenges, and sustainable assessment. *Journal of environmental management*, 2022, vol. 306, p. 114461. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114461>

SAKAMOTO, Maiko, et al. Water pollution and the textile industry in Bangladesh: flawed corporate practices or restrictive opportunities?. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no 7, p. 1951. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su11071951>

SHARMA, Sudhanshu, et al. Calcium-modified hierarchically porous aluminosilicate geopolymer as a highly efficient regenerable catalyst for biodiesel production. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no 80, p. 65454-65461. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C5RA01823D>

SAPUTRA, E., et al. Synthesis of geopolymer from rice husk ash for biodiesel production of *Calophyllum inophyllum* seed oil. En IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018. p. 012019. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/345/1/012019>

SINGH, Rajat Pratap, et al. Treatment and recycling of wastewater from textile industry. En Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future. Springer, Singapore, 2019. p. 225-266. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1468-1_8

TOMEI, M. Concetta; PASCUAL, Jesica Soria; ANGELUCCI, Domenica Mosca. Analysing performance of real textile wastewater bio-decolourization under different reaction environments. Journal of Cleaner Production, 2016, vol. 129, p. 468-477. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.028>

WANG, D. M. Environmental protection in clothing industry. En sustainable development: Proceedings of the 2015 International Conference on sustainable development (ICSD2015). 2016. p. 729-735. Disponible en: https://doi.org/10.1142/9789814749916_0076

YASEEN, D. A.; SCHOLZ, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. International journal of environmental science and technology, 2019, vol. 16, no 2, p. 1193-1226. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>

ZHANG, Xiaorui, et al. Synergistic effects of iron (Fe) and biochar on light-weight geopolymers when used in wastewater treatment applications. Journal of Cleaner Production, 2021, vol. 322, p. 129033. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129033>

ZHANG, Yao-Jun, et al. An Eco-friendly Fly Ash-Based Geopolymer: Synthesis and Photocatalytic Properties. Chin. J. Inorg. Chem., 2017, vol. 33, no 1, p. 16-25. Disponible en: <https://doi.org/10.11862/CJIC.2017.011>

ZHANG, Yao Jun, et al. A new In₂O₃ and NiO co-loaded fly ash-based nanostructural geopolymer for photocatalytic H₂ evolution. Integrated

Ferroelectrics, 2017, vol. 182, no 1, p. 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10584587.2017.1352376>

ZHANG, Yao Jun, et al. A novel electroconductive graphene/fly ash-based geopolymer composite and its photocatalytic performance. Chemical Engineering Journal, 2018, vol. 334, p. 2459-2466. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.171>

ZHANG, Yao Jun; HE, Pan Yang; CHEN, Hao. A novel CdO/graphene alkali-activated steel slag nanocomposite for photocatalytic degradation of dye wastewater. Ferroelectrics, 2018, vol. 522, no 1, p. 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00150193.2017.1391587>

ZHANG, Yao Jun, et al. A new CaWO₄/alkali-activated blast furnace slag-based cementitious composite for production of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, vol. 42, no 6, p. 3690-3697. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.173>

ZHANG, Yao Jun, et al. Synthesis of a novel alkali-activated magnesium slag-based nanostructural composite and its photocatalytic performance. Applied Surface Science, 2015, vol. 331, p. 399-406. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.090>

ZHANG, Yao Jun, et al. Green transforming metallurgical residue into alkali-activated silicomanganese slag-based cementitious material as photocatalyst. Materials, 2018, vol. 11, no 9, p. 1773. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma11091773>

ANEXOS

	FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
DATOS DEL AUTOR:		
PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACION	LUGAR DE PUBLICACION
TIPO DE INVESTIGACION:		
CÓDIGO:		
PALABRAS CLAVES:		
CATALIZADORES MAS USADOS		
DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AGUAS RESIDUALES DE COLORANTES		
CONDICIONES DE SÍNTESIS DE LOS CATALIZADORES		
RESULTADOS:		
CONCLUSIONES:		

Elaboración propia



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Originalidad del Autor

Yo, MONGE PORRAS VIVIANA YUMIRA estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Aplicación de Geopolímeros como Catalizadores para la Degradación Fotocatalítica de las Aguas Residuales de Tinte: Revisión Sistemática", es de mi autoría, por lo tanto, declaro que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
MONGE PORRAS VIVIANA YUMIRA DNI: 42953433 ORCID 1798583523685118	Firmado digitalmente por: VMONGE15 el 15-06-2022 17:08:12

Código documento Trilce: INV - 0708814