



UNIVERSIDAD PERUANA  
**CAYETANO HEREDIA**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Determinación de la eficiencia del proceso de fotocátalisis heterogénea empleando materiales basados en grafeno para la remoción de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita en las aguas residuales de la industria textil**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autores**

Milagros Angela Marcelo Travezaño

Leonardo Jose Raul Plasencia Leon

**Asesor**

Dr. Pierre Giovanny Ramos Apestegui

**Lima, Perú**

**2025**

**Jurado calificador**

**Presidente:** Mg. Victor Alberto Huanambal Sovero

**Vocal:** Mg. Flor Maria Ortega Blas

**Secretario:** Dr. Harry Anderson Rivera Tito

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

### Los egresados:

| N° | APELLIDOS Y NOMBRES               |
|----|-----------------------------------|
| 1. | MARCELO TRAVEZAÑO MILAGROS ANGELA |
| 2. | PLASENCIA LEON LEONARDO JOSE RAUL |

Pertencientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**, autores del trabajo titulado: **Determinación de la eficiencia del proceso de fotocatalisis heterogénea empleando materiales basados en grafeno para la remoción de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita en las aguas residuales de la industria textil**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL** bajo la modalidad de **TESIS**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

| N° | APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE | FACULTAD | NIVEL DE ASESORÍA |
|----|---------------------------------|----------|-------------------|
| 1. | RAMOS APESTEGUI PIERRE GIOVANNY | FACI     | ASESOR            |

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **10%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3458915694**; fecha de entrega: **16/01/2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 16 de enero de 2026**



Firma del asesor

N° DNI: 46360400

ORCID: 0000-0002-7857-4747

## Dedicatoria

“A mis padres, por siempre creer en mí;  
A mi abuelito Víctor, quién desde allá arriba me ha  
estado acompañando en cada etapa de este viaje;  
A mi familia, por todo el cariño y amor que  
siempre me brindaron”

*Leonardo Plasencia*

“A mi madre incondicional, quién ha  
estado en todo momento conmigo. Muy  
agradecida por su apoyo, amor y enseñarme  
a ver el mundo desde otro ángulo. Este  
triunfo es totalmente tuyo, madre”

*Milagros Marcelo*

## **Agradecimiento**

Agradezco a mis papás, siempre me apoyaron desde el momento 0 hasta el final, incluso cuándo consideraba rendirme; a mi hermana menor por motivarme a ser la mejor figura de responsabilidad para ella; a mi asesor, el profesor Pierre, por el enorme apoyo que nos brindó durante este trabajo y las invaluable lecciones que nos dejó en el proceso; por último, agradezco a mi compañera, por ser la mejor acompañante y complemento durante esta travesía, por siempre tenderme la mano cuándo las cosas se ponían difíciles y por permitirme siempre devolverle su confianza a través de mis acciones y compromiso.

*Leonardo Plasencia*

Quiero agradecer a una de las personas más importantes de mi vida, a mi madre, por ser el motor y la fuerza en los momentos más difíciles e importantes durante mi etapa universitaria. Su ejemplo de perseverancia y constancia me ha motivado a lograr mis objetivos. Gracias por brindarme tu cuidado, apoyo y amor incondicional. Agradecer a mi asesor Pierre por su apoyo constante y dedicación durante toda la elaboración de nuestra tesis. Por otro lado, quiero agradecer a mi compañero de tesis, que a través de su capacidad de organización y paciencia pudimos culminar de manera satisfactoria nuestra tesis.

*Milagros Marcelo*

## **ÍNDICE**

|   |            |
|---|------------|
| <b>RESUMEN</b>  | <b>1</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>   | <b>2</b>   |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b>  | <b>3</b>   |
| 1.1. Contaminación del agua y sus consecuencias                     | 3          |
| 1.2. Contaminación del agua desde la industria textil               | 5          |
| 1.3. Tratamiento de aguas residuales de la industria textil         | 7          |
| 1.4. Procesos avanzados de oxidación                                | 11         |
| 1.5. Justificación  | 21         |
| <b>II. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN</b>                                | <b>23</b>  |
| <b>III. OBJETIVOS</b>   | <b>23</b>  |
| <b>IV. METODOLOGÍA</b>  | <b>24</b>  |
| 4.1. Tipo de Estudio  | 24         |
| 4.2. Área de Estudio  | 25         |
| 4.3. Actividades  | 26         |
| 4.4. Análisis de la información                                     | 39         |
| <b>V. RESULTADOS</b>  | <b>41</b>  |
| 5.1. Porcentaje de remoción   | 41         |
| 5.2. Cinética de degradación  | 48         |
| 5.3. Fuente de luz  | 54         |
| <b>VI. DISCUSIÓN</b>  | <b>58</b>  |
| 6.1. Factores que afectan el rango de los porcentajes de remoción   | 58         |
| 6.2. Factores que afectan la cinética de degradación                | 64         |
| 6.3. Factores del tipo de luz que mejoran el porcentaje de remoción | 68         |
| <b>VII. CONCLUSIONES</b>  | <b>70</b>  |
| <b>VIII. RECOMENDACIONES</b>  | <b>71</b>  |
| <b>IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                               | <b>73</b>  |
| <b>ANEXOS</b>   | <b>102</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tabla 1.</b> Principales grupos cromóforos de los colorantes   | <b>10</b> |
| <b>Tabla 2.</b> Comparación de las características físicas y químicas del agua residual textil con los valores permitidos para su vertimiento según normativas nacionales e internacionales | <b>11</b> |
| <b>Tabla 3.</b> Eficiencias de remoción generales de PAO para colorantes y DQO  | <b>20</b> |
| <b>Tabla 4.</b> Cadenas de términos de referencia empleadas para la búsqueda de artículos de cada objetivo específico   | <b>29</b> |
| <b>Tabla 5.</b> Tabla de Operacionalización de variables  | <b>39</b> |
| <b>Tabla 6.</b> Valores promedio, máximo, mínimo y desviación estándar de los valores de porcentaje de remoción recopilados para el CR y MG   | <b>42</b> |
| <b>Tabla 7.</b> Valores promedio, máximo, mínimo y desviación estándar de los valores de cinética de degradación recopilados para el CR y MG  | <b>48</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 1.</b> Distribución de las fuentes de contaminación industrial  | <b>4</b>  |
| <b>Figura 2.</b> Posiciones de los bordes de las bandas de diferentes fotocatalizadores en relación con varios potenciales redox a un pH de 7                                 | <b>17</b> |
| <b>Figura 3.</b> Mecanismo de la fotocatalisis heterogénea  | <b>18</b> |
| <b>Figura 4.</b> Mapa de hotspots de publicaciones científicas  | <b>26</b> |
| <b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo de la revisión sistemática   | <b>32</b> |
| <b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo del análisis descriptivo   | <b>34</b> |
| <b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo de la primera y segunda fase del análisis estadístico  | <b>36</b> |
| <b>Figura 8.</b> Diagrama de flujo de la tercera fase del análisis estadístico  | <b>37</b> |
| <b>Figura 9.</b> Diagrama de flujo de las actividades de la tesis   | <b>38</b> |
| <b>Figura 10.</b> Comparación entre los valores de remoción correspondientes al Rojo Congo obtenidos mediante el empleo de MBG y TiO <sub>2</sub> como fotocatalizadores      | <b>42</b> |
| <b>Figura 11.</b> Comparación entre los valores de remoción correspondientes al Verde Malaquita obtenidos mediante el empleo de MBG y TiO <sub>2</sub> como fotocatalizadores | <b>43</b> |
| <b>Figura 12.</b> Prueba de U de Mann-Whitney de las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del Rojo Congo                                       | <b>44</b> |
| <b>Figura 13.</b> Prueba de U de Mann-Whitney de las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del Verde Malaquita                                  | <b>46</b> |
| <b>Figura 14.</b> Porcentajes de remoción de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita empleando materiales basados en grafeno  | <b>47</b> |
| <b>Figura 15.</b> Prueba de U de Mann-Whitney de las variables porcentaje de remoción y tipo de colorante   | <b>48</b> |
| <b>Figura 16.</b> Comparación entre los valores de la cinética de remoción para el Rojo Congo, empleando MBG y TiO <sub>2</sub> como fotocatalizadores                        | <b>49</b> |
| <b>Figura 17.</b> Comparación entre los valores de la cinética de remoción para el Verde Malaquita, empleando MBG y TiO <sub>2</sub> como fotocatalizadores                   | <b>50</b> |
| <b>Figura 18.</b> Prueba de U de Mann-Whitney de las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del Rojo Congo   | <b>51</b> |
| <b>Figura 19.</b> Prueba de U de Mann-Whitney de las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del Verde Malaquita                                    | <b>52</b> |
| <b>Figura 20.</b> Diagrama de caja de los valores de cinética de degradación del Rojo Congo y Verde Malaquita empleando materiales basados en grafeno                         | <b>53</b> |
| <b>Figura 21.</b> Prueba de U de Mann Whitney de las variables cinética de reacción y tipo de colorante   | <b>54</b> |
| <b>Figura 22.</b> Comparación de los porcentajes de remoción promedios alcanzados por los diferentes tipos de luz para la degradación del Rojo Congo                          | <b>55</b> |
| <b>Figura 23.</b> Comparación de los porcentajes de remoción promedios alcanzados por los diferentes tipos de luz para la degradación del Verde Malaquita                     | <b>56</b> |
| <b>Figura 24.</b> Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables porcentaje de remoción y tipo de   |           |

luz para la remoción del Rojo Congo

57

**Figura 25.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables porcentaje de remoción y tipo de luz para la remoción del Verde Malaquita

58

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

| Abreviatura                    | Significado                                |
|--------------------------------|--|
| CR                             | Rojo Congo                                 |
| MG                             | Verde Malaquita                            |
| DBO                            | Demanda Bioquímica de Oxígeno              |
| DBO <sub>5</sub>               | Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días |
| DQO                            | Demanda Química de Oxígeno                 |
| pH                             | Potencial de Hidrógeno                     |
| UNT                            | Unidades Nefelométricas de Turbidez        |
| ST                             | Sólidos Totales                            |
| PAOs                           | Procesos Avanzados de Oxidación            |
| UV                             | Ultravioleta                               |
| COT                            | Carbono Orgánico Total                     |
| MBG                            | Materiales Basados en Grafeno              |
| ANOVA                          | Análisis de Varianza                       |
| ODS                            | Objetivo de Desarrollo Sostenible          |
| rGO                            | Óxido de Grafeno reducido                  |
| GEI                            | Gases de Efecto Invernadero                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido férrico                              |
| CdS                            | Sulfuro de cadmio                          |
| ZnO                            | Óxido de zinc                              |
| TiO <sub>2</sub>               | Dióxido de titanio                         |
| CO <sub>2</sub>                | Dióxido de carbono                         |
| NiO                            | Óxido de níquel                            |
| Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de galio                             |
| H <sub>2</sub> O               | Agua o óxido de dihidrógeno                |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | Peróxido de hidrógeno                      |

## RESUMEN

La industria textil es considerada uno de los sectores más contaminantes del recurso hídrico, siendo el proceso de teñido uno de los que genera una elevada carga de contaminantes, debido a que aproximadamente el 60% de los tintes empleados en esta industria se destinan a la coloración de las prendas. Dentro de los colorantes más utilizados se encuentran el Rojo Congo (CR) y el Verde Malaquita (MG), los cuales presentan un elevado nivel de toxicidad. Esta problemática ha adquirido una gran relevancia, debido a que estos compuestos son capaces de ocasionar efectos cancerígenos y mutagénicos en los seres humanos, sumada a la ausencia de sistemas de tratamiento eficaces que permitan su adecuada remoción en la actualidad. Por ello, el objetivo de este trabajo es determinar la eficiencia del proceso de fotocátalisis heterogénea empleando diversos materiales basados en grafeno como fotocatalizadores; midiendo su eficiencia en términos de porcentaje de remoción, cinética de degradación y fuente de luz óptima, para la eliminación de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita presentes en aguas residuales de la industria textil. La metodología empleada durante el estudio incorporó pasos establecidos de la lista de verificación PRISMA 2020. Se realizó una revisión sistemática de los valores obtenidos para cada variable considerada, así como un análisis descriptivo y estadístico para validar la eficiencia del proceso a través de los valores recopilados. Los resultados obtenidos para el tratamiento del Rojo Congo y Verde Malaquita indicaron que los porcentajes de remoción alcanzados por los materiales basados en grafeno se encuentran mayoritariamente en un rango del 90% al 100%. Las cinéticas de degradación presentaron velocidades mayoritariamente en el rango de  $0.05 \text{ min}^{-1}$  a  $0.45 \text{ min}^{-1}$ , y se determinó que la luz solar fue la fuente de luz óptima para la degradación de ambos colorantes. Además, se confirmó la importancia de las variables analizadas para el proceso de fotocátalisis: el tipo de luz empleada, el porcentaje de remoción y la cinética de degradación. Asimismo, se encontró que el tipo de material utilizado como fotocatalizador también constituye otra variable de gran importancia.

**Palabras clave:** "fotocatálisis heterogénea", "grafeno" "colorantes", "porcentaje de remoción", "industria textil"

## **ABSTRACT**

The textile industry is the second most polluting sector of water resources, mainly due to its dyeing process, which generates a large amount of pollutants, as approximately 60% of the dyes used in this industry are used to color garments. Among the most commonly used dyes are Congo Red (CR) and Malachite Green (MG), which are highly toxic. This problem has reached considerable magnitude due to the fact that these compounds are capable of causing carcinogenic and mutagenic effects in humans and the fact that effective treatment systems for their removal are currently lacking. Therefore, the objective of this work is to determine the efficiency of the heterogeneous photocatalysis process using various graphene-based materials as photocatalysts, measuring their efficiency in terms of removal percentage, degradation kinetics, and optimal light source, for the elimination of Congo Red and Malachite Green dyes present in wastewater from the textile industry. The methodology employed during the study incorporated established steps from the PRISMA 2020 checklist. A systematic review of the values obtained for each variable considered was performed, as well as a descriptive and statistical analysis to validate the process efficiency through the collected values. The results obtained for the treatment of Congo Red and Malachite Green indicated that the removal percentages achieved by the graphene-based materials were mostly within a range of 90% to 100%. The degradation kinetics presented rates mostly in the range of  $0.05 \text{ min}^{-1}$  to  $0.45 \text{ min}^{-1}$ , and sunlight was determined to be the optimal light source for the degradation of both dyes. Furthermore, the importance of the variables analyzed for the photocatalysis process was confirmed: the type of light used, the removal percentage, and the degradation kinetics. Likewise, the type of material used as a photocatalyst was also found to be another highly important variable.

**Keywords:** "heterogeneous photocatalysis", "graphene", "dyes", "removal percentage", "textile industry"

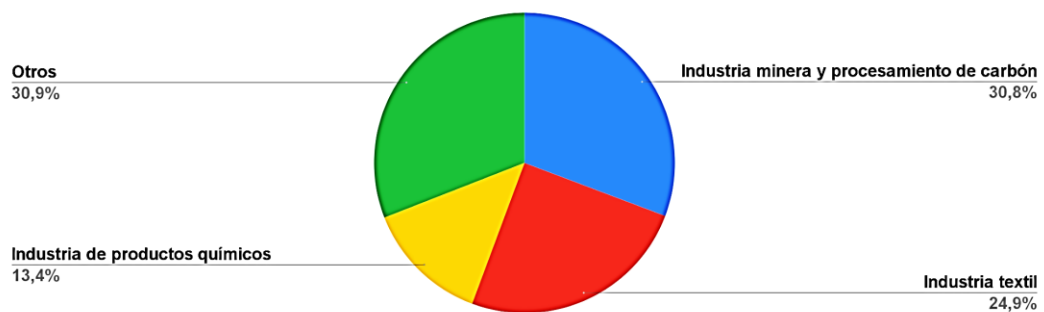
# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Contaminación del agua y sus consecuencias

Alrededor del 97% del agua se encuentra en los océanos, y aproximadamente el 3% es agua dulce [1]. De esta proporción, el 69% está contenido en los casquetes polares, nieve y hielo; alrededor del 31%, en acuíferos subterráneos y menos del 1% es accesible para el consumo o uso en diferentes actividades del ser humano [1]. Ante el crecimiento poblacional y la industrialización, la escasa cantidad de reserva de agua dulce aprovechable está en constante amenaza debido a la presencia de contaminantes naturales y antropogénicos. Esto es ocasionado por el inapropiado vertimiento de residuos sólidos y líquidos a las fuentes de agua durante las actividades realizadas por comunidades e industrias a lo largo del tiempo. Se estima a nivel mundial que el 80% del agua contaminada se vierte directamente, sin previo tratamiento, a los cuerpos de agua [2]. Como consecuencia de esta mala práctica se ha observado una reducción en la calidad del agua, tanto de la subterránea como la superficial [2].

La contaminación del recurso hídrico no solo representa un peligro para los diferentes ecosistemas presentes en el agua, sino que contribuye indirectamente a la propagación de enfermedades transmitidas por este recurso vital [3]. Aproximadamente, 190 millones de personas contraen enfermedades transmitidas por la contaminación del agua y a partir de ello, 60 mil mueren al año [4]. Ciertos contaminantes como bifenilos policlorados (PCB) y pesticidas, se han asociado al padecimiento de trastornos psicológicos como la depresión, ansiedad en las personas; inclusive está relacionada con enfermedades físicas como el cáncer, enfermedades gastrointestinales y desnutrición [3]. Por ello, es importante difundir los efectos de la contaminación del agua, tanto en la salud de la población como en el medio ambiente [3]. En relación con las fuentes de contaminación, estas pueden ser agrícolas, municipales, naturales o industriales [3]. Dentro de las fuentes industriales, se destacan la generación de energía térmica, la minería de carbón, el

procesamiento de petróleo, el uso de fertilizantes químicos, la industria textil, el procesamiento de cuero, entre otras actividades [5]. Un estudio de muestreo llevado a cabo en el río Dahei, provincia de Mongolia Interior, en China, registró a la industria minera y el procesamiento de carbón, la industria textil y la de productos químicos, en ese orden, como las mayores fuentes de contaminación (Figura 1) [5]. Para su categorización, se empleó una metodología de recopilación de indicadores de agua provenientes de estaciones de monitoreo y efluentes industriales para después, mediante la aplicación del método Apriori, detectar patrones de asociación de los diferentes indicadores de agua con el objetivo de identificar cuáles fueron las industrias que liberan una mayor concentración de contaminantes [5].



**Figura 1.** Distribución de las fuentes de contaminación industrial. **Fuente:** Elaboración propia a partir de los datos de Wang y col. 2024 [5].

La contaminación del agua puede clasificarse como física, biológica o química (orgánica e inorgánica), la cual depende del tipo de contaminante presente en las aguas residuales [3]. Por ejemplo, los contaminantes físicos incluyen a la acumulación de sedimentos, quienes impiden la incidencia de la luz solar en sus profundidades del cuerpo receptor, impidiendo así que la energía necesaria llegue a la biota residente en el interior. Por otro lado, los contaminantes químicos incluyen disolventes industriales, pesticidas, plásticos, colorantes textiles, entre otros [3]. Finalmente, dentro de los contaminantes biológicos encontramos a los virus, bacterias, parásitos, los cuales ingresan al agua a través de los desechos fecales debido a un inadecuado tratamiento [3].

Por último, las diferentes actividades económicas dependen de una fuente de agua constante y de calidad, sin embargo, pueden verse afectadas por el aumento de contaminantes en el agua. A su vez, esto conlleva a una disminución en la productividad manufacturera y funcionalidad natural del ecosistema, el cual genera un mayor costo de operación y mantenimiento debido a la presencia de contaminantes como sedimentos y materia orgánica. Por otro lado, se ha evidenciado que la contaminación del agua genera un gran gasto en la atención de pacientes contagiados de enfermedades transmitidas por los contaminantes del agua [6]. No obstante, se ha demostrado que este impacto no afecta a todos por igual. Las personas de niveles socioeconómicos bajos sufren más intensamente los efectos negativos de la contaminación en comparación de aquellos que cuentan con mayores recursos. Sin embargo, esto no implica que las personas con mayores ingresos estén exentas de los efectos de la contaminación; simplemente, tienen mayores posibilidades de tomar medidas para minimizar su exposición, como mudarse a sitios con menor riesgo de contaminación del agua [7].

## **1.2. Contaminación del agua desde la industria textil**

Dentro del sector industrial, la textil es considerada uno de los sectores más contaminantes del agua en algunos países, como en China. Un ejemplo de ello es un estudio llevado a cabo en el río Dahei mediante la aplicación de sistemas de alerta temprana como el algoritmo Apriori han podido identificar a los contaminantes textiles como los segundos de mayor presencia en relación al daño sobre el medio acuático [5]. Por otra parte, la producción masiva de prendas por año a nivel mundial contribuye significativamente a este problema. Dentro de la producción de prendas en la industria textil, se llevan a cabo seis procesos principales: preparación, blanqueo, teñido, estampado, aprestos y acabados [8]. Entre estos procedimientos, el proceso de teñido es el más complejo y donde se genera la mayor carga de contaminantes debido a la diversidad de colorantes textiles empleados [8]. Estudios han demostrado que

el proceso de teñido consume más del 60% de los tintes totales en la industria textil [9], de los cuales entre el 10% al 20% se liberan en las aguas residuales [9].

Los colorantes textiles son sustancias, naturales o artificiales, que aportan color a las fibras textiles. Estos colorantes pueden ser clasificados como pigmentos o tintes [10]. Los pigmentos son insolubles, mientras que los tintes son fácilmente disueltos en agua. En la industria textil, se prefieren los tintes artificiales debido a cuatro características claves [10]:

- Estabilidad química
- Resistencia a la degradación química, física y biológica
- Capacidad de mantener la intensidad del color, luego del proceso de teñido
- Bajo costo

Dentro de esta industria, los principales colorantes utilizados son: azoico, antraquinona, índigo, xanteno y triarilmetano [10]. En particular, los colorantes azoicos se destacan por su nivel de toxicidad entre 60% y 70%. Además, estos colorantes son cancerígenos y más resistentes a los tratamientos convencionales [10]. Dentro de esta clase de colorantes, se encuentra el rojo congo (CR), tinte aniónico hidrosoluble, el cual es usado ampliamente por la industria textil debido a su alta afinidad por las fibras de celulosa [9,11]. A su vez, el CR se sintetiza a través del acoplamiento de dos productos no biodegradables: ácido naftiónico y bencidina bidiazotada [9]. Además, el colorante CR tiene un impacto negativo en la vida acuática por varias razones. Primero, restringe la penetración de la luz solar hacia las profundidades de los cuerpos receptores, lo que impide el proceso de fotosíntesis de la flora acuática [12]. Además, este colorante interfiere en la reproducción de los organismos acuáticos [11]. A su vez dificulta la respiración de los seres acuáticos al disminuir el oxígeno disuelto a causa del aumento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) [11]. Adicionalmente, la toxicidad de este tinte sintético orgánico también afecta la salud del ser humano. Uno de sus subproductos, la bencidina, está relacionado con el cáncer

de vejiga [13]. Por otro lado, los colorantes de la clase triarilmetano afectan gravemente el metabolismo, debido a que estos compuestos se acumulan y penetran en la piel e inducen efectos cancerígenos [10]. El Verde Malaquita (MG), un colorante catiónico, es el colorante más estudiado de este grupo, dado que su nivel de toxicidad afecta al sistema inmunológico [14,15]. Además, el MG es soluble en agua y puede teñir una variedad de materiales como la seda, el yute, el algodón, el papel y el acrílico [14,15]. Cuando este colorante se expone a luz solar dentro del ecosistema acuático, se transforman en una serie de productos peligrosos y persistentes para el ambiente, como resultado de reacciones biológicas y fotoquímicas [16]. Entre las principales reacciones se tienen a la N-desmetilación, hidroxilación y escisión, las cuales producen como producto final derivados de la benzofenona (4-dimetilamina). El drenaje de aguas contaminadas que contengan MG puede generar acumulación de este contaminante mediante la absorción de esta sustancia a través de la cadena alimentaria, un fenómeno conocido como bioacumulación [14]. En consecuencia, ambos colorantes son muy tóxicos para la fauna y flora acuáticas [16].

### **1.3. Tratamiento de aguas residuales de la industria textil**

Los procesos de tratamiento de aguas residuales de industrias textiles son bastante diversos, debido a que los efluentes provenientes de estas industrias son sumamente variados tanto en su composición como en su caudal. Por lo tanto, no existe un único tipo de tratamiento aplicable en todos los casos [17]. Existe una amplia gama de tratamientos existentes para esta clase de aguas residuales, que incluyen el tamizado, la homogeneización, neutralización, así como procesos fisicoquímicos y biológicos [17,18]. Adicionalmente, se pueden emplear, tecnologías de filtración o evaporación para facilitar el reúso del agua [17].

Los métodos de tratamiento convencionales siguen un orden de etapas que incluye en primer lugar procesos de tratamiento físicos, como el tamizado, para

eliminar contaminantes sólidos de gran tamaño, y la sedimentación, que facilita la separación de partículas suspendidas por gravedad [19]. Luego, se realizan procesos de homogeneización encargados de estabilizar las fluctuaciones en el caudal [18]. Posteriormente, se aplica la coagulación-floculación, un proceso que remueve coloides y sólidos suspendidos mediante la adición de sustancias coagulantes que permiten la formación de flóculos sedimentables [19]. Este tratamiento puede reducir en promedio un 50% la DQO en los efluentes textiles [18].

Sin embargo, estos métodos convencionales resultan ineficientes para el tratamiento y remoción de colorantes debido a la alta solubilidad en agua y a las complejas estructuras aromáticas de estos compuestos [17,18]. Como se observa en la **Tabla 1**, los colorantes azoicos presentan un grupo cromóforo constituido por un doble enlace de moléculas de nitrógeno (-N=N-), siendo en muchos casos necesaria su ruptura para degradar estos compuestos, lo que puede desencadenar la formación de grupos amino aromáticos con un nivel de toxicidad aún mayor [20]. Por otro lado, las antraquinonas presentan una estructura compuesta por tres anillos, dos de ellos de bencénicos, y un par de dobles enlaces C=O, lo que les confiere insolubilidad en agua y alcohol, además de una alta resistencia a la corrosión [21].

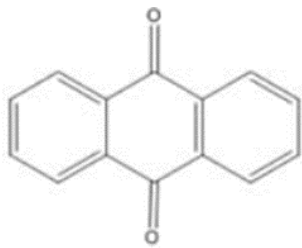
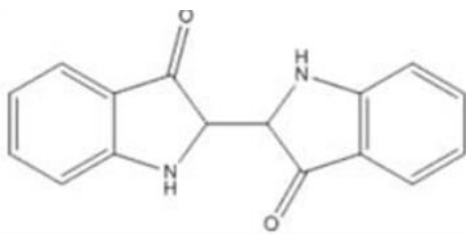
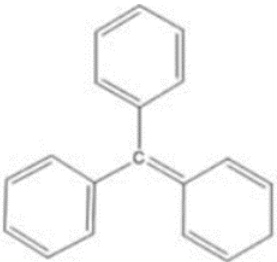
En otro contexto, los compuestos indólicos se caracterizan por una estructura basada en el indol, que consiste en un anillo de seis átomos de carbono con enlaces dobles alternados, unido a otro anillo que contiene cuatro átomos de carbono y uno de nitrógeno. Entre los tintes más representativos de este grupo se encuentran el índigo y sus análogos, como la indirubina [22]. No obstante, se ha demostrado que la producción de jeans libera grandes cantidades de índigo, lo que representa un riesgo significativo para la vida acuática, debido a que este colorante se caracteriza por ser cancerígeno y mutagénico [23].

Por otro lado, los triarilmetanos son otro tipo de colorantes, compuestos por cadenas de trifenilmetano con diversos sustituyentes en los anillos arílicos, como grupos alcoxi y halógenos, entre otros [24]. Estos colorantes son

ampliamente utilizados por su alta solubilidad en el agua y su amplio espectro de colores, además de su bajo costo en el mercado, lo cual favorece económicamente a la industria textil [25]. Sin embargo, presentan propiedades tóxicas y cancerígenas que afectan tanto a los animales como a los seres humanos. Además, representan un riesgo para los ecosistemas acuáticos, ya que obstaculizan la transmisión de la luz solar, afectando la actividad fotosintética [26].

A causa de todo lo anterior, los colorantes son sustancias altamente persistentes, lo que dificulta la depuración eficaz de las aguas residuales provenientes de la industria textil mediante procesos químicos o fisicoquímicos, debido a su alta resistencia [17,18]. Si bien el uso de compuestos derivados del cloro o el ozono como desinfectantes es una de las medidas tradicionales más empleadas para eliminar a los colorantes, no resulta efectiva en su totalidad, ya que la diversidad estructural de estos compuestos los hace resistentes a los ataques químicos [18,19].

Por otra parte, los tratamientos biológicos basados en la degradación microbiana también presentan bajos índices de efectividad [18]. Se estima que aproximadamente el 90% de los colorantes persisten después de pasar a través de un sistema de lodos activados [18], mientras que otros tratamientos biológicos que involucran procesos anaeróbicos-aeróbicos no son fácilmente escalables [27]. Además, el hecho de que las empresas textiles utilicen una gran cantidad de colorantes químicos en períodos cortos de tiempo aumenta la variedad de la composición en los efluentes [18], lo que complica aún más su eliminación. La complejidad que precisan estos procesos de remoción deja en evidencia que las plantas de tratamiento convencionales son ineficaces para garantizar el correcto tratamiento de los colorantes antes de su vertido. Esto es especialmente crítico, considerando que en la mayoría de los países se exige eliminar hasta un 98% de los colorantes presentes en los efluentes de la industria textil [28].

| Tipo de colorante | Grupo cromóforo  |
|-------------------|--|
| Azoicos           | -N=N-  |
| Antraquinonas     |    |
| Indólicos         |    |
| Triarilmetanos    |  |

**Tabla 1.** Principales grupos cromóforos de los colorantes - **Fuente:** Cortázar Martínez y col. 2014 [18].

Por todo lo expuesto, es fundamental desarrollar alternativas que aborden adecuadamente la complejidad que requiere el tratamiento de colorantes en los efluentes de la industria textil (**ver Tabla 2**), con el objetivo de mitigar los riesgos de contaminación ambiental que representan estos compuestos [17,18]. En este contexto, los procesos avanzados de oxidación surgen como una opción prometedora, por encima de otros tratamientos convencionales como la coagulación o la absorción.

| Parámetro | pH | Turbidez | DQO | DBO <sub>5</sub> | ST |
|-----------|----|----------|-----|------------------|----|
|           |    |          |     |                  |    |

|  |       | (UNT) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
|--|-------|-------|--------|--------|--------|
| Valor en aguas residuales textiles                     | 7.06  | 308   | 420    | 36.5   | 1341   |
| Valor en agua apta para el vertimiento (Perú)          | 6 - 9 | 5     | 100    | 500    | 500    |
| Valor en agua apta para el vertimiento (Internacional) | 6 - 9 | 5     | 150    | 200    | 1500   |

**Tabla 2.** Comparación de las características físicas y químicas del agua residual textil con los valores permitidos para su vertimiento según normativas nacionales e internacionales - **Fuente:** Gilpavas y col. 2018; MINSA, 2010; Gonzales y col. 2023; Truque, 2006; Aquae, 2020 [28-31].

#### 1.4. Procesos avanzados de oxidación

Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs) son tratamientos fisicoquímicos capaces de degradar, de manera total o parcial, la estructura química de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluidos metales pesados y patógenos presentes en aguas residuales [32]. Estos procesos transforman una amplia variedad de contaminantes en compuestos estables e inocuos, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) [32]. Su mecanismo de funcionamiento se fundamenta en la generación de especies transitorias con un gran poder oxidante, conocidas como radicales libres, destacando principalmente los radicales hidroxilos ( $\bullet$ OH) [32-34]. Estos radicales se generan principalmente por medios fotoquímicos y se utilizan para oxidar efluentes contaminados con compuestos de alta estabilidad química o baja biodegradabilidad [33]. Su alto potencial de oxidación proviene del electrón desapareado del oxígeno, que los convierte en especies extremadamente reactivas [35]. Estas especies tienen una notable capacidad para extraer átomos de hidrógeno de otras moléculas,

generando productos inocuos, como el agua, a través de sus reacciones [34]. A nivel práctico, los PAOs suelen aplicarse a pequeña y mediana escala, resultando más eficientes en el tratamiento de aguas contaminadas con compuestos tóxicos, incluso cuando se encuentran en concentraciones muy bajas (< 5 mg/l) o muy altas (> 1 g/l) [36]. Se destacan sobre los métodos convencionales de tratamiento por varias ventajas, entre las que se incluyen:

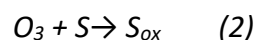
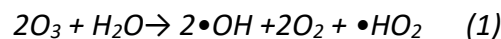
- La mineralización de contaminantes mediante un proceso de transformación y destrucción química [34,37]
- Suelen ser bastante eficaces contra compuestos recalcitrantes a los procesos de tratamiento biológico [32,34]
- Usualmente no generan subproductos contaminantes después del tratamiento [32,34].
- La capacidad para aumentar la biodegradabilidad de contaminantes emergentes [33].
- Su idoneidad para tratar contaminantes en concentraciones muy bajas, fuera del alcance de los tratamientos convencionales [34,36].
- Permiten mejorar las propiedades organolépticas del agua [34].
- Pueden emplearse a presión y temperatura ambientes [35].
- Sus costos operacionales son más bajos que en los tratamientos convencionales [34].

Adicionalmente, estos procesos se pueden emplear tanto de manera individual como combinados entre sí, generando una sinergia conocida como tecnología híbrida. Asimismo, pueden integrarse con procesos tradicionales ya existentes para tratar contaminantes en el aire y el suelo [37]. Según diversos estudios, se ha determinado que generalmente estos procesos suelen seguir una cinética de reacción de primer orden, con velocidades de reacción que varían entre  $10^6$ - $10^{12}$  L/mol.s [34], mientras que las concentraciones de radicales hidroxilo oscilan entre  $10^{10}$ - $12^{12}$  mg/L [33]. Es gracias a su facilidad de aplicación, que estos procesos se pueden emplear efectivamente para degradar químicamente los colorantes presentes en los efluentes de las industrias textiles [33]. En la

actualidad, se utilizan como parte del tratamiento terciario en algunas plantas de tratamiento *in situ*, tanto para aguas industriales como residuales municipales. Sin embargo, su uso y difusión en regiones como América Latina es aún limitado [32].

Los PAOs se dividen en dos grandes grupos: los procesos no fotoquímicos y los fotoquímicos [34,35]. Los primeros emplean distintas formas de energía, excluyendo la lumínica, para generar los radicales hidroxilos [34,37]. Por otra parte, los segundos se centran en el empleo de energía lumínica para asegurar la remoción de los contaminantes, lo que permite aumentar su velocidad de reacción haciendo más compactos los sistemas de tratamiento [34].

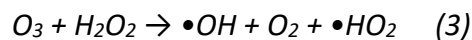
Un ejemplo de PAO no fotoquímico se tiene a la ozonización [35]. Este proceso, como su nombre indica, se caracteriza por el empleo del ozono (O<sub>3</sub>), debido a sus destacadas propiedades como agente oxidante y bactericida para la desinfección de aguas residuales [35]. Estas propiedades permiten mejorar las características organolépticas y de biodegradabilidad de efluentes acuosos extremadamente contaminados [35]. Adicionalmente, el ozono es considerado un compuesto ecológicamente amigable con el medio ambiente [35]. La ozonización implica la reacción del O<sub>3</sub> con el agua, lo que genera radicales hidroxilos como producto de su descomposición. Estos radicales, que son potentes agentes oxidantes, aumentan la capacidad de degradación de los contaminantes, haciendo que este PAO sea particularmente eficaz [34]. El tratamiento con ozono se puede llevar a cabo en un medio alcalino de manera indirecta (1), o al reaccionar directamente con un sustrato orgánico en medio ácido (2), siendo esta última opción considerablemente más lenta [34,35].



**Ec. 1 & 2. Reacción de ozonización en medio alcalino y ácido [34]**

La reacción (2) se utiliza principalmente para tratar compuestos orgánicos no

saturados, los cuales poseen grupos amino o cromóforos que reaccionan rápidamente con el ozono en medio ácido [34]. En cuanto a la reacción (1), esta puede llevarse a cabo mediante compuestos como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HO}_2^-$ ,  $\text{HCOO}^-$ ,  $\text{HO}^-$ , lo que indica que los medios alcalinos son más eficientes para este proceso [34]. Además, es posible combinar el ozono con otros agentes oxidantes para conseguir un efecto sinérgico que aumente el grado de degradación de los contaminantes [32,37]. Entre los agentes más utilizados se encuentra el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), un oxidante poco selectivo, de acción rápida y altamente soluble, capaz de mejorar el rendimiento de un oxidante selectivo como el ozono [35]. El  $\text{H}_2\text{O}_2$  facilita la transferencia de electrones necesaria para la descomposición del  $\text{O}_3$  y la generación de radicales libres (3).



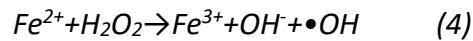
*Ec. 3. Descomposición de  $\text{O}_3$  mediante  $\text{H}_2\text{O}_2$  por transferencia de electrones [34]*

A pesar de que este PAO posee una destacada cantidad de ventajas, como la generación de productos inocuos como  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , la ausencia olores y sabores desagradables, y su gran versatilidad [35], también presenta algunas desventajas [34]:

- Es una técnica que no se puede llevar a cabo a muy altas temperaturas debido al riesgo de volatilización de los compuestos [35].
- Es difícil predecir un rendimiento y sinergia eficientes cuándo se combina el ozono con otro agente oxidante [35].
- A nivel operacional, el costo de implementación para conseguir las condiciones requeridas para la ozonización es elevado [34].
- Los productos de oxidación intermedia son resistentes a este tipo de tratamiento [34].

Otro ejemplo de PAO no fotoquímico es el proceso Fenton, nombrado de esa manera en honor al químico británico Henry J. Fenton, quién en 1894 lo describió por primera vez [35]. Su mecanismo consiste en un proceso químico

de oxidación que implica la introducción de sales de hierro en una solución ácida con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) [37]. Esta combinación desencadena la generación de radicales hidroxilos a través de la descomposición del peróxido de hidrógeno, al interactuar con iones ferrosos (Fe<sup>2+</sup> o Fe<sup>3+</sup>), los cuales actúan como catalizadores [38-40].



*Ec. 4. Reacción de formación de radicales hidroxilos durante el proceso Fenton [40]*

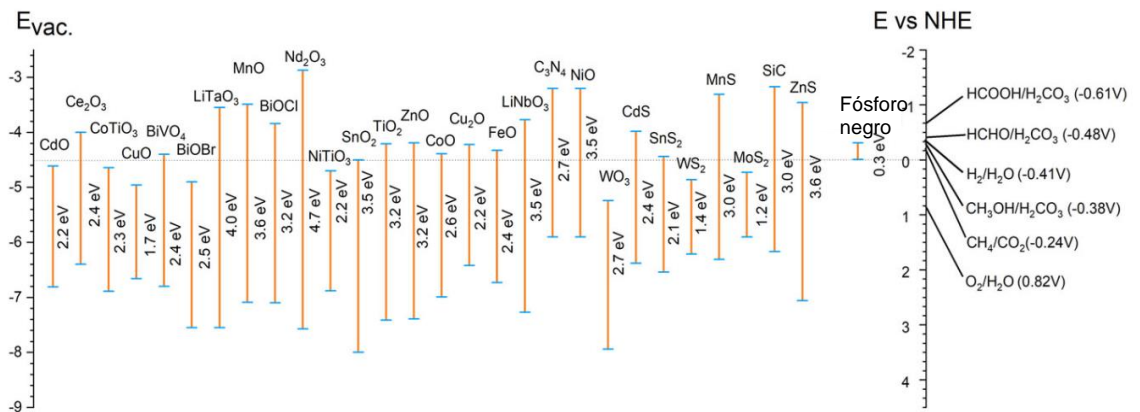
El proceso Fenton se enfoca en el uso de procesos de mineralización para conseguir un aumento de la biodegradabilidad y reducción de la toxicidad, permitiendo incluso la posibilidad de reutilización de aguas residuales, ya que este PAO genera residuos inocuos para el medio ambiente [38,40]. El alto potencial de oxidación del fenton le ha permitido ser empleado como tratamiento de compuestos aromáticos clorados, fenoles, colorantes azoicos, entre otros contaminantes [34]. En contraste, pocos compuestos son resistentes a este tratamiento, como las parafinas, la acetona y ciertos compuestos organoclorados [34,40]. Actualmente, se ha comprobado su alta capacidad para remover tanto el color de efluentes como los subproductos de industrias textiles, así como para la disminución de la DQO, llegando a alcanzar porcentajes de remoción superiores al 80% [38]. Al mismo tiempo, se han llevado a cabo procesos de hibridación para mejorar el rendimiento del proceso Fenton empleando diversos elementos. Entre estos, se destaca la variante foto-Fenton, un proceso fotoquímico que emplea la luz solar para aumentar el rendimiento y acelerar la velocidad del proceso Fenton [39,40]. La luz solar activa el peróxido de hidrógeno por medio de la radiación UV, lo que aumenta la cantidad de radicales hidroxilos generados, gracias al proceso de foto-reducción de los iones de hierro [37,39,40]. Sin embargo, esta variante del proceso Fenton presenta una desventaja asociada a los iones ferrosos, ya que provoca la formación de lodos de hierro por floculación de los reactivos con las moléculas de tinte [37]. Además, es necesario añadir continuamente sales de

hierro, ya que estos catalizadores no son reutilizables, así como mantener el pH en niveles ácidos. Esto conlleva un gasto constante en la compra y almacenamiento de los materiales requeridos [35,37,39], lo que a su vez aumenta los costos operacionales tanto del proceso Fenton como del foto-Fenton.

En el ámbito de los procesos avanzados de oxidación fotoquímica, la fotocatalisis homogénea se destaca como una opción relevante [41,42]. Este proceso se caracteriza por tener tanto el catalizador como los reactantes disueltos en la misma fase, es decir, en una solución homogénea, lo que generalmente ocurre en fase acuosa [40]. El foto-fenton puede ser considerado un tipo de fotocatalisis homogénea, en el cual el catalizador de hierro se encuentra disuelto en forma de sulfato [40]. Este proceso se distingue por permitir una rápida reducción del carbono orgánico total presente (COT) presente en aguas residuales, así como de pesticidas [41,42]. Además, emplea períodos de adsorción cortos y tiempos de mineralización de alrededor de 60 minutos, empleando tanto luz ultravioleta como luz solar durante la fotocatalisis [41]. Aunque se podría considerar la mejor opción por su destacada eficiencia y cinética [39], la principal desventaja de los procesos de fotocatalisis homogénea radica en que los fotocatalizadores empleados pueden llegar a ser bastante costosos y no reutilizables, como ocurre en el proceso foto-Fenton, principalmente por el hecho de llevarse a cabo en un medio acuoso [39,40].

Por otra parte, se encuentra la fotocatalisis heterogénea, donde el catalizador usualmente un semiconductor [43] y los sustratos están en fases diferentes, a diferencia de la fotocatalisis homogénea. En este caso, el catalizador suele estar en fase sólida, mientras que los sustratos se encuentran en fase acuosa [42]. Este proceso implica una reacción química que combina la luz solar, visible o ultravioleta junto con un catalizador, el cual debe activarse y reaccionar al exponerse a la fuente de luz. Idealmente, el catalizador debe ser químicamente estable, fácil de producir, y sencillo de utilizar [43]. Ejemplos comunes de semiconductores empleados en la fotocatalisis heterogénea son: el óxido

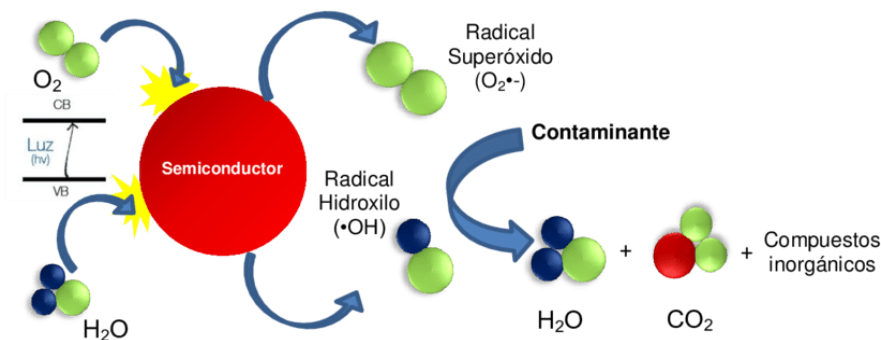
férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), el sulfuro de cadmio (CdS), el óxido de zinc (ZnO), el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), entre otros [43] (ver Figura 2). El principal objetivo del catalizador es acelerar la velocidad de la reacción química a través de una compleja secuencia de reacciones [44]. La energía radiante es absorbida por el fotocatalizador, permitiendo que, en la región interfacial entre la solución acuosa y la superficie del catalizador excitado, ocurran las reacciones de degradación y remoción de contaminantes [34].



**Figura 2.** Posiciones de los bordes de las bandas de diferentes fotocatalizadores en relación con varios potenciales redox a un pH de 7 -

Fuente: Djurišić, He & Alan, 2020 [45]

El proceso de fotocatalisis heterogénea permite tratar las aguas residuales, eliminando patógenos y degradando contaminantes hasta su mineralización mediante el proceso de oxidación fotocatalítica [46]. Este proceso muestra altos índices de eficiencia (ver Tabla 3) en la degradación y reducción de contaminantes orgánicos en aguas residuales, en comparación con otros procesos avanzados de oxidación [46]. Además, es un método de bajo costo y sostenible, gracias al aprovechamiento de la energía solar [35], lo que permite generar radicales hidroxilos de forma económica y ecológica, generando subproductos inofensivos [46] (ver Figura 3). Otro aspecto positivo es que el fotocatalizador no sufre cambios químicos durante el tratamiento, por lo que, a diferencia de la fotocatalisis homogénea, existe la posibilidad de reutilizarlo y reducir los costos de operación [34,41].



**Figura 3.** Mecanismo de la fotocatalisis heterogenea - **Fuente:** Sandoval & Molina, 2016 [47]

Actualmente, se conoce que las nanoestructuras de  $\text{TiO}_2$  son de los fotocatalizadores más empleados para el tratamiento de aguas residuales. Estas estructuras, con dimensiones en la escala nanométrica, presentan propiedades físicas, químicas y electrónicas diferentes a las que exhiben en estado macro o micro [48,49]. Su clasificación depende del número de dimensiones en escala nanométrica [48]:

- Dimensión cero (0D)
- Monodimensionales (1D)
- Bidimensionales (2D)
- Tridimensionales (3D)

Los nanomateriales de  $\text{TiO}_2$  destacan por su alto rendimiento en los procesos de degradación que ocurren en la superficie del semiconductor [50]. Debido a su tamaño extremadamente reducido, que puede abarcar de una hasta tres dimensiones [54], sus propiedades superficiales se ven significativamente mejoradas [50]. En línea con lo anterior, el  $\text{TiO}_2$  es de los semiconductores más accesibles económicamente y se distingue por su elevada estabilidad fisicoquímica [35,41]. En comparación con otras opciones, como el sulfuro de cadmio ( $\text{CdS}$ ) o el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), el  $\text{TiO}_2$  sobresale no solo por su alta eficiencia catalítica, sino también por su seguridad. Mientras que el  $\text{CdS}$  y el  $\text{ZnO}$  continúan siendo objeto de investigación debido a su mayor toxicidad, el  $\text{TiO}_2$  es considerado un compuesto inofensivo para los seres humanos [41,43]. Los

principales productos resultantes de la degradación de contaminantes mediante la fotocatalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador son el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$  [43].

Adicionalmente, existe la posibilidad de combinar el  $\text{TiO}_2$  con otras nanoestructuras para conseguir un efecto de sinergia y aumentar la eficiencia y velocidad del proceso de degradación [51]. En este sentido, el grafeno ha ganado considerable atención como material fotocatalizador innovador [51,52], gracias a las notables propiedades y características que poseen sus nanoestructuras, entre las que destacan:

- Estructura bidimensional única que maximiza la presencia de sitios activos con nanopartículas fotocatalíticas [51,53].
- Alta resistencia mecánica y notable estabilidad fotoquímica [54].
- Propiedades eléctricas que facilitan el transporte de electrones sin dispersión [54].
- Alta conductividad, que permite una gran movilidad de electrones [51,53].
- Amplia superficie porosa que acelera el proceso de degradación [55].
- Alto contenido de carbono, que favorece la generación de radicales  $\bullet\text{OH}$  [56].
- Capacidad para interactuar con diversas longitudes de onda de luz [53-55].
- Eficiente degradación de colorantes orgánicos sintéticos [55].

Además de estas propiedades excepcionales, el grafeno se destaca por su capacidad de producción a gran escala y a bajo costo [51], así como por ser respetuoso con el medio ambiente [53,54], lo que lo convierte en una opción prometedora en diversas aplicaciones. Se ha comprobado que la combinación del grafeno con dióxido de titanio en procesos de degradación mediante fotocatalisis heterogénea mejora significativamente la separación de cargas, incrementa la capacidad de adsorción de los sustratos a eliminar y favorece un aumento en la conductividad de los catalizadores [51]. En la actualidad, el grafeno se proyecta como una alternativa sumamente atractiva para mejorar el rendimiento del proceso de fotocatalisis heterogénea, especialmente en la

eliminación de colorantes y otros contaminantes en los efluentes de las industrias textiles [51].

Esta capacidad de los materiales basados en grafeno para eliminar colorantes se relaciona con su interacción selectiva con enlaces específicos [51,52], como los del grupo azo (N=N). Durante la fotocatalisis heterogénea, estos materiales actúan como excelentes conductores, facilitando la transferencia de carga hacia los electrones  $\pi$  del colorante [51,53]. Cuando la energía de los fotones absorbidos es suficiente para promover los electrones excitados desde el orbital enlazante hasta el orbital antienlazante ( $\pi^*$ ) del enlace azo, este se debilita y, eventualmente, se rompe, iniciando el proceso de degradación del compuesto [57].

| PAO                                   | Parámetro  |     | Fuente  |
|---------------------------------------|------------|-----|---------|
|                                       | Colorantes | DQO |         |
| Ozonización en medio alcalino         | 90%        | 86% | [58]    |
| Ozonización con peróxido de hidrógeno | 90%        | 91% | [32,59] |
| Fenton                                | 50%        | 97% | [28,32] |
| Foto-Fenton                           | 50%        | 60% | [60]    |
| Fotocatalisis homogénea               | 90%        | 66% | [61]    |
| Fotocatalisis heterogénea             | 95%        | 80% | [62]    |

**Tabla 3.** Eficiencias de remoción generales de PAO para colorantes y DQO -  
**Fuente:** Elaboración propia

Comparativamente, en términos económicos y operativos, los procesos avanzados de oxidación de tipo fotoquímico se destacan por encima de los no fotoquímicos. Esto se debe a que, al emplear una fuente de energía renovable,

como la energía lumínica, sus costos operacionales son más reducidos y menos variables en comparación con los procesos no fotoquímicos, que requieren inversiones continuas en la adquisición de catalizadores. Adicional a lo anterior, los catalizadores empleados en los métodos fotoquímicos tienen un costo significativamente menor, lo que hace que estos procesos sean una opción más competitiva y rentable.

Dentro de los métodos fotoquímicos, la fotocatalisis heterogénea sobresale por encima de los demás procesos para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil, no solo por su mayor eficiencia en la remoción de colorantes, como se muestra en la **Tabla 3**, sino también por la reusabilidad de sus catalizadores, en contraste con la fotocatalisis homogénea. Su rendimiento puede incrementarse significativamente al emplear fotocatalizadores basados en grafeno, combinados con diferentes materiales semiconductores, como por ejemplo el  $\text{TiO}_2$ . Este último, en particular, magnifica su eficacia gracias a las propiedades excepcionales previamente mencionadas del grafeno como fotocatalizador.

### **1.5. Justificación**

La industria textil ha generado un gran impacto ambiental debido, en gran parte, a su significativo aporte a la economía global y al exceso de producción de prendas de vestir generado anualmente [8]. En particular, el proceso de teñido es una de las etapas más contaminantes de la industria textil [8], ya que en él se emplea aproximadamente el 60 % de los colorantes utilizados en la fabricación de textiles para conferir color e intensidad a las prendas [9].

Dentro de la clasificación de los tintes más usados tenemos al grupo azo, conocidos por su alta intensidad y bajo costo [10], y los trifenilmetanos, los cuales destacan por su elevada toxicidad para los organismos vivos [10]. La presencia de estos compuestos en los efluentes industriales representa un riesgo ambiental significativo, afectando ecosistemas acuáticos y la salud humana. Dado su alto nivel de uso y peligrosidad, este estudio selecciona dos

colorantes representativos de cada grupo: Rojo Congo y Verde Malaquita **[9,10,15]**. Su análisis permitirá evaluar el impacto de estos contaminantes y desarrollar estrategias para su mitigación, contribuyendo a soluciones más sostenibles en la industria textil.

Encontrar soluciones a la contaminación generada por estos colorantes en la industria textil se ha vuelto prioritario para enfrentar estos contaminantes emergentes, permitiendo una alternativa de reutilización de este recurso hídrico para su uso en diferentes actividades realizadas por el ser humano **[35]**. Esto es crucial, debido a la amenaza constante que sufre la cantidad de reserva de agua para consumo humano, el cual representa menos del 1% del total **[1]**. A ello se suma la ineficacia de los tratamientos convencionales para la remoción de los colorantes en aguas residuales textiles **[18]**, lo que agrava aún más la crisis hídrica. Esta ineficiencia se debe, en gran medida, a la falta de investigación en alternativas de tratamiento frente a la toxicidad y persistencia de colorantes como el Rojo Congo y Verde Malaquita, los cuales se encuentran dentro del grupo de los más usados y peligrosos **[18]**. Estos compuestos presentan alta resistencia a los métodos de depuración tradicionales, lo que demanda la búsqueda de estrategias innovadoras para su remoción efectiva **[18]**.

En este contexto, los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), y en particular la fotocatalisis heterogénea, emergen como una nueva propuesta que requiere ser considerada, debido a su alta eficiencia para el tratamiento de contaminantes textiles **[35]**. Esta tecnología ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad y viabilidad económica, ya que emplea procesos naturales y puede aprovechar la energía solar como fuente de activación **[35]**. Dada la creciente crisis energética mundial, la implementación de procesos fotoquímicos se perfila como una solución innovadora y ecoeficiente **[35]**.

La posibilidad de industrializar este innovador y eco-amigable método de tratamiento en una región donde su potencial aún no ha sido completamente explorado invita a investigar todas sus posibilidades a una escala mayor **[32]**.

Por ello, resulta fundamental evaluar su viabilidad para implementarse en plantas de tratamiento de aguas mejorando así la gestión de los recursos hídricos y establecer un nuevo paradigma en el tratamiento de contaminantes en la industria textil. En particular, la combinación del dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), uno de los fotocatalizadores de mayor empleo en la actualidad, con nanomateriales novedosos como el grafeno, se presenta como una estrategia prometedora para incrementar la eficiencia del proceso [44]. La sinergia entre estos materiales podría potenciar la capacidad de degradación de los contaminantes, optimizando el rendimiento del tratamiento fotoquímico [44].

En consecuencia, el presente estudio busca profundizar en el desarrollo y aplicación de la fotocatálisis heterogénea como una solución innovadora y sostenible para la remediación de efluentes textiles. La investigación contribuirá a cerrar la brecha existente en el conocimiento sobre la industrialización de este proceso, promoviendo su implementación como una alternativa viable y eficiente en la gestión de aguas residuales [51].

## **II. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cuán eficiente es el proceso de fotocatálisis heterogénea al emplear materiales basados en grafeno como fotocatalizadores para la remoción de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita en aguas residuales de la industria textil, considerando los parámetros que influyen en su rendimiento?

## **III. OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Determinar la eficiencia del proceso de fotocatálisis heterogénea empleando diversos materiales basados en grafeno como fotocatalizadores; en términos de porcentaje de remoción, cinética de degradación y fuente de luz óptima, para la eliminación de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita presentes en aguas residuales de la industria textil.

### **Objetivos específicos**

- **Determinar los porcentajes de remoción (%)** de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea, utilizando como referencia los resultados obtenidos con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>).
- **Determinar las cinéticas de degradación (min<sup>-1</sup>)** de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita a través del proceso de fotocátalisis heterogénea, utilizando como referencia los resultados obtenidos con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>).
- **Identificar las fuentes de luz óptimas (nm)** que permitan alcanzar la máxima remoción de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea.
- **Identificar los factores clave que optimizan la eficiencia del proceso de fotocátalisis heterogénea**, independientemente de la magnitud de las diferencias observadas en los resultados.

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1. Tipo de Estudio

El tipo de estudio implementado durante este proyecto de tesis fue, en primer lugar, de naturaleza no experimental, ya que no se buscó generar un escenario específico para probar algún diseño experimental que permitiese comprobar o validar una hipótesis. Asimismo, el enfoque se direccionó hacia la recopilación de la mayor cantidad de información disponible respecto a los procesos de fotocátalisis heterogénea. Se consideraron diversas variables, incluyendo diferentes tipos de fotocatalizadores basados en grafeno, la cinética de degradación, la fuente de luz y el tipo de colorante, con el objetivo de determinar las eficiencias en la remoción de los colorantes Rojo Congo (CR) y Verde de Malaquita (MG). Los datos fueron obtenidos a partir de estudios existentes en los que los procesos de tratamiento fueron realizados y registrados de manera natural o controlada. Además, se tomaron como referencia los resultados obtenidos con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) para comparar los porcentajes de remoción y cinética de degradación de los materiales

basados en grafeno.

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo un estudio descriptivo y analítico, el cual requirió de una revisión sistemática de diversos documentos, tales como artículos académicos y publicaciones científicas, tanto en español como en inglés. Este análisis permitió profundizar en las diferentes etapas del proceso de fotocatalisis. Asimismo, se adoptó un enfoque correlacional que permitió examinar las relaciones entre los componentes claves del proceso: los reactivos (como los colorantes), el fotocatalizador (materiales basados en grafeno), el tipo de fuente de luz y la cinética de degradación. Este enfoque es crucial para entender cómo las variaciones en las variables a estudiar, documentadas en trabajos previos, afectan la eficiencia de remoción de los colorantes, expresada en términos de porcentaje.

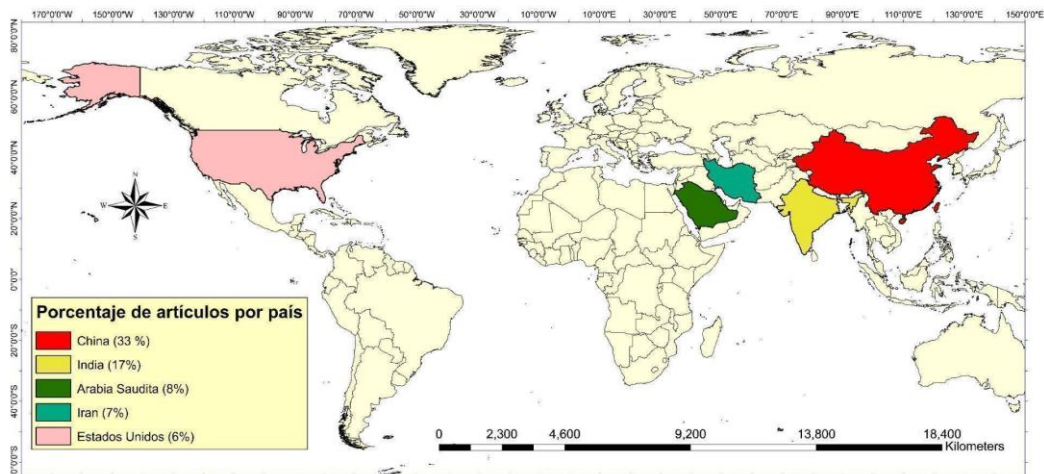
Finalmente, el estudio presenta un carácter exploratorio, orientado a establecer una base para futuras investigaciones sobre la posibilidad de aplicar el tratamiento mediante fotocatalisis heterogénea a escala industrial. Este enfoque no solo busca aportar conocimiento sobre las eficiencias de remoción, sino también evaluar la viabilidad de la fotocatalisis en contextos industriales, lo que puede ser de gran relevancia para el desarrollo sostenible en la gestión de aguas residuales.

#### **4.2. Área de Estudio**

La revisión de la literatura tuvo un alcance global, por lo que la determinación del área de estudio se desarrolló a partir de la identificación de *hotspots* en la literatura científica relacionada con la fotocatalisis heterogénea. A través de una búsqueda y revisión de 260 artículos científicos publicados en bases de datos de literatura científica como *Scopus*, se encontró que el 33% del total de publicaciones se originaron en China, lo que lo convierte en el *hotspot* principal en este campo de investigación. Otros países con menor porcentaje de publicaciones incluyeron a la India (17%), Arabia Saudita (8%), Irán (7%) y los Estados Unidos (6%), identificados como *hotspots* secundarios [63]. Esta

distribución geográfica de las publicaciones subraya la importancia y el interés en el estudio de la fotocatalisis heterogénea en diversas regiones, lo que puede ofrecer perspectivas sobre las variaciones en métodos, enfoques y aplicaciones en el tratamiento de diversos contaminantes.

La identificación de estos *hotspots* no solo orienta el enfoque del estudio hacia las áreas de mayor producción científica, sino que también permite establecer comparaciones y buscar tendencias en la investigación sobre la eficiencia de los fotocatalizadores, contribuyendo así a la formulación de objetivos que pueden guiar futuros estudios en contextos industriales.



**Figura 4.** Mapa de hotspots de publicaciones científicas. **Fuente:** Elaboración propia a partir de la base de datos Scopus.

### 4.3. Actividades

Para cumplir con los objetivos específicos establecidos, se llevó a cabo una revisión sistemática, haciendo uso de los pasos de la lista de verificación PRISMA 2020 [64], la cual sirvió como guía para la ejecución de las distintas etapas de la metodología y la discusión de los resultados. La primera etapa consistió en un exhaustivo registro y recopilación de literatura disponible en diversas plataformas digitales y bases de datos, tales como Scopus, ScienceDirect, Proquest, Google Académico y ResearchGate, abarcando publicaciones en

español e inglés. En esta fase inicial, se efectuó una primera ronda de revisión haciendo énfasis en los siguientes elementos de cada artículo: título, resumen (*abstract*) y las palabras clave (*keywords*). Esta revisión fue llevada a cabo de forma individual por ambos tesisistas, quienes posteriormente compararon los resultados obtenidos de sus búsquedas. En los casos en que surgieron discrepancias respecto a la inclusión o exclusión de algún artículo, estas se resolvieron mediante discusión y consenso, priorizando la relevancia del documento en relación con los objetivos de la investigación. Los estudios incluidos en la revisión utilizaron diferentes tipos de matrices acuosas: algunos emplearon soluciones de colorante en agua destilada, mientras que otros trabajaron con matrices más complejas que simulaban efluentes textiles, lo que se tomó en cuenta en el análisis comparativo.

Durante esta primera etapa también se utilizaron términos de referencia precisos en función de cada objetivo específico, manteniendo como marco general el concepto de “fotocatálisis heterogénea”. Estos términos de referencia se utilizaron en español e inglés, y se combinaron mediante cadenas de búsqueda con los operadores booleanos AND y OR (**Ver Tabla 4**).

Para cumplir con el primer objetivo específico, se llevaron a cabo cuatro búsquedas con el fin de recopilar la mayor cantidad de información relevante. Estas búsquedas se centraron en artículos de investigación cuya temática principal fuese la degradación de los colorantes CR y MG mediante el proceso de fotocatalisis heterogénea. Las primeras dos búsquedas se enfocaron en identificar un número determinado de artículos para cada colorante, en los que el material fotocatalizador empleado fuese un material basado en grafeno. Se consideraron estudios en los que dicho compuesto se hubiese empleado tanto de forma aislada como combinado con otros materiales. El mismo procedimiento se aplicó para las siguientes dos búsquedas, pero en este caso se analizaron los artículos en los que el  $\text{TiO}_2$  fuese el fotocatalizador principal, considerando únicamente documentos en los que este compuesto fuese empleado en su forma prístina. Para todas estas búsquedas, se emplearon como

palabras clave los nombres de los dos colorantes junto con el del fotocatalizador correspondiente. Además, se incluyeron los términos “porcentaje” y “eficiencia” como criterios principales para garantizar el cumplimiento de este primer objetivo.

Para abordar el segundo objetivo específico, se realizaron nuevas búsquedas enfocándose en la recopilación de información sobre la velocidad de degradación en el proceso de fotocatálisis heterogénea para cada colorante. En esta etapa, se empleó el término “cinética” como referencia.

Finalmente, para el cumplimiento del tercer objetivo específico, es importante mencionar que inicialmente se había considerado el uso de unidades de irradiancia ( $W/m^2$ ) para medir la longitud de onda de las distintas fuentes de luz consideradas para este estudio. Sin embargo, debido al reducido número de artículos hallados en los que se empleaban estas unidades, se optó por recopilar artículos en los que la longitud de onda se expresa en nanómetros (nm). La revisión de la literatura se realizó considerando aspectos claves del proceso de fotocatálisis heterogénea, utilizando como términos de búsqueda: “fuente”, “luz”, “ultravioleta”, “visible” y “solar”. Todas las cadenas de términos de referencia y operadores booleanos empleados en estas búsquedas bibliográficas se encuentran recopiladas en la **Tabla 4**.

| Objetivo específico/<br>Specific objective | Cadenas de términos de referencia/Terms of reference chains  | Idioma/Language |
|--|--|-----------------|
| 1  | “fotocatálisis heterogénea” AND “rojo congo” AND “porcentaje” AND “eficiencia” AND “grafeno” OR “TiO <sub>2</sub> ”      | Español         |
|  | “fotocatálisis heterogénea” AND “verde malaquita” AND “porcentaje” AND “eficiencia” AND “grafeno” OR “TiO <sub>2</sub> ” |                 |
|  | “heterogeneous photocatalysis” AND “congo red” AND “percentage” AND “efficiency” AND “graphene” OR “TiO <sub>2</sub> ”   | English         |

|   |   |         |
|---|---|---------|
|   | “heterogeneous photocatalysis” AND “malachite green” AND “percentage” AND “efficiency” AND “graphene” OR “TiO <sub>2</sub> ”          |         |
| 2 | “fotocatálisis heterogénea” AND “rojo congo” AND “cinética” AND “grafeno” OR “TiO <sub>2</sub> ”                                      | Español |
|   | “fotocatálisis heterogénea” AND “verde malaquita” AND “cinética” AND “grafeno” OR “TiO <sub>2</sub> ”                                 |         |
|   | “heterogeneous photocatalysis” AND “congo red” AND “kinetics” AND “graphene” OR “TiO <sub>2</sub> ”                                   | English |
|   | “heterogeneous photocatalysis” AND “malachite green” AND “kinetics” AND “graphene” OR “TiO <sub>2</sub> ”                             |         |
| 3 | “fotocatálisis heterogénea” AND “rojo congo” AND “fuente” AND “luz” AND “ultravioleta” AND “grafeno” OR “TiO <sub>2</sub> ”           | Español |
|   | “fotocatálisis heterogénea” AND “verde malaquita” AND “fuente” AND “luz” AND “ultravioleta” AND “grafeno” OR “TiO <sub>2</sub> ”      |         |
|   | “heterogeneous photocatalysis” AND “Congo red” AND “source” AND “light” AND “ultraviolet” AND “graphene” OR “TiO <sub>2</sub> ”       | English |
|   | “heterogeneous photocatalysis” AND “malachite green” AND “source” AND “light” AND “ultraviolet” AND “graphene” OR “TiO <sub>2</sub> ” |         |

**Tabla 4.** Cadenas de términos de referencia empleadas para la búsqueda de artículos de cada objetivo específico - **Fuente:** Elaboración propia

Una vez finalizada la primera etapa del proceso de revisión sistemática, se tuvieron recopilados una amplia cantidad de documentos científicos, lo que permitió proceder con la segunda etapa de la revisión. Esta consistió en evaluar los artículos recopilados con el objetivo de obtener una síntesis respecto a la información para el cumplimiento tanto de los objetivos específicos como con el objetivo general. Durante este proceso, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión bien definidos para seleccionar las fuentes de información más adecuadas. A continuación, se detallan dichos criterios.

### Criterios de inclusión

- Investigaciones sobre el tratamiento de aguas residuales de industrias textiles mediante fotocátalisis heterogénea.
- Estudios centrados en la eliminación de contaminantes como el Rojo Congo y Verde Malaquita a través de fotocátalisis heterogénea.
- Resultados expresados en datos cuantitativos.
- Estudios de tipo experimental y correlacional.
- Información de bases de datos electrónicas y libros especializados.
- Trabajos cuyos datos estén relacionados a las variables porcentaje de remoción (%), cinética de degradación de primer orden ( $\text{min}^{-1}$ ) y fuentes de luz medidas según su longitud de onda (nm).

### Criterios de exclusión

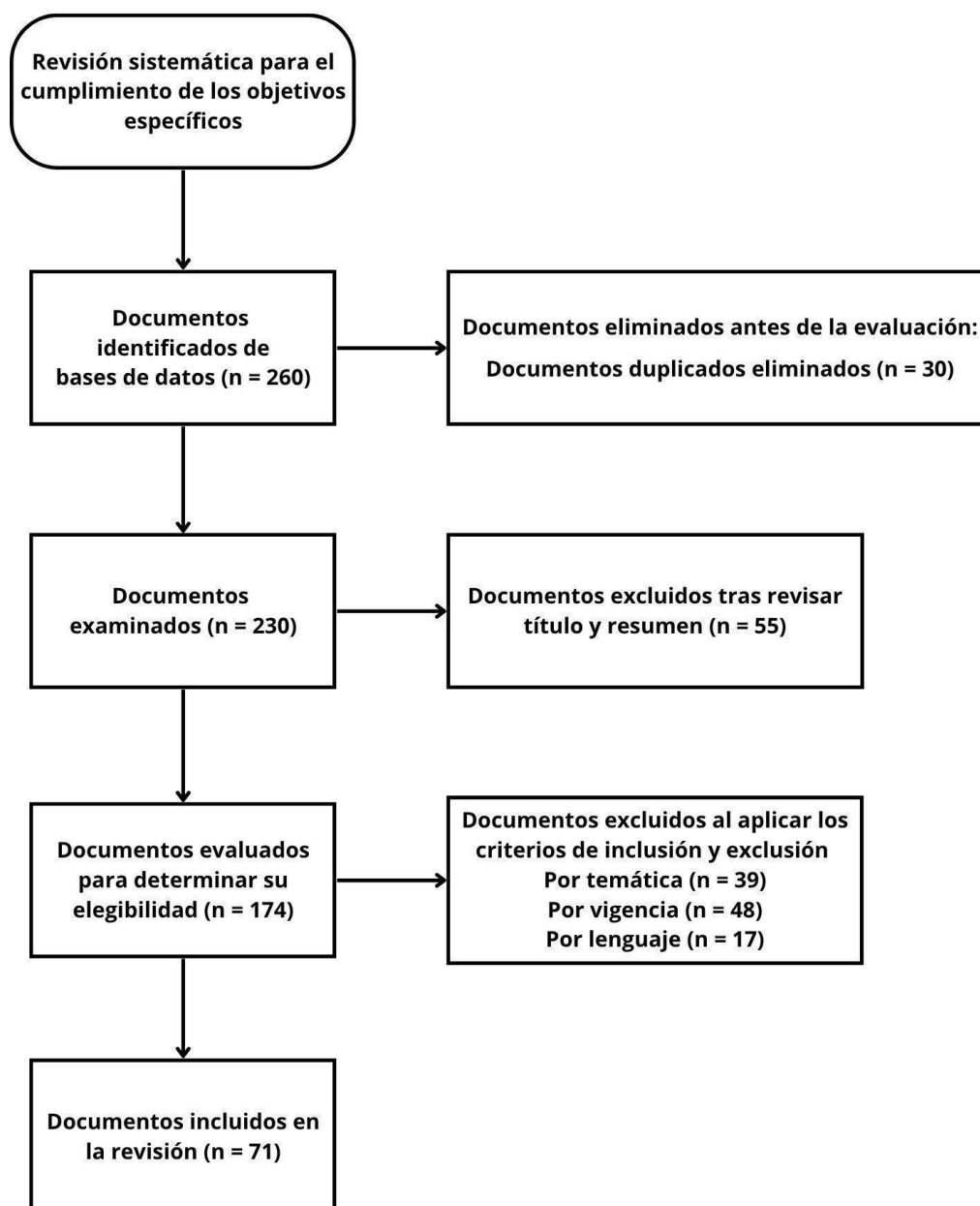
- Estudios publicados con una antigüedad mayor a 6 años.
- Investigaciones escritas en idiomas distintos al español o inglés.
- Resultados expresados principalmente de manera cualitativa.
- Estudios de tipo no experimental.
- Información proveniente de páginas web y trabajos de tesis.
- Trabajos cuyos datos no estén relacionados a las variables porcentaje de remoción (%), cinética de degradación de primer orden ( $\text{min}^{-1}$ ) y/o fuentes de luz medidas según su longitud de onda (nm).

La segunda etapa de revisión fue realizada de manera conjunta por ambos tesisistas, lo que permitió analizar con mayor detalle el cumplimiento o incumplimiento de los criterios previamente establecidos. Una vez culminada la etapa de filtrado de los documentos, se examinó a fondo toda la información recopilada para extraer los datos cuantitativos más relevantes relacionados con las variables de estudio.

Para esta tercera etapa de la revisión sistemática, ambos tesisistas procedieron al análisis de los datos mediante la operacionalización de variables, con el fin de cumplir los objetivos específicos. Para el primer objetivo, se identificaron los

datos cuantitativos que reflejan la eficiencia de remoción en procesos de fotocatalisis heterogénea empleando materiales basados en grafeno, comparando los valores porcentuales de remoción para ambos colorantes con los alcanzados empleando  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador de referencia. Esta comparación permitió contrastar los valores obtenidos con grafeno frente a los registrados con  $\text{TiO}_2$ .

En el segundo objetivo específico, el análisis de información se enfocó en identificar las constantes de velocidad para las reacciones de degradación durante el tratamiento, expresadas en valores de  $\text{min}^{-1}$ . Además, se analizaron gráficas que ilustran este procedimiento para ambos colorantes. En relación con el último objetivo específico, el análisis de la información permitió identificar la fuente de luz más utilizada en las investigaciones, así como la óptima para el proceso fotocatalítico. Esta evaluación se realizó en función de la frecuencia de uso y la longitud de onda de la luz, expresada en nanómetros (nm), además del origen natural o artificial de la fuente de luz. El tipo de colorante también se consideró como una variable adicional. Una vez finalizada la valorización de los datos recopilados durante el análisis de información, se procedió con su análisis descriptivo. La **Figura 5** muestra el flujograma correspondiente a la etapa de revisión sistemática.

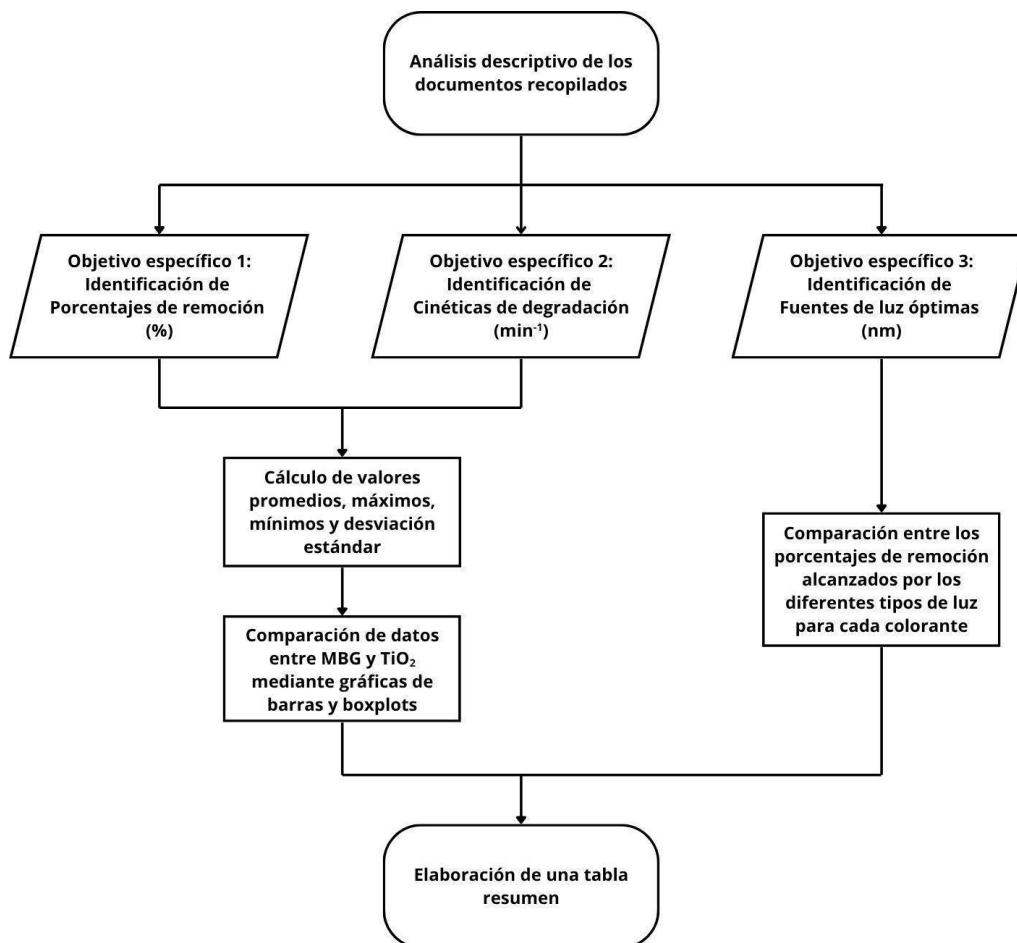


**Figura 5.** Diagrama de flujo de la revisión sistemática. **Fuente:** Adaptado de [64].

Tras analizar todos los datos recopilados, se elaboró una tabla resumen con la información cuantitativa y cualitativa de cada variable, previa al análisis descriptivo de cada objetivo específico. En total, se obtuvieron 30 conjuntos de datos por colorante, cada uno correspondiente a las variables consideradas para la consecución de los objetivos. Para abordar el primer objetivo específico, se incluyeron además nueve conjuntos de datos adicionales por colorante, utilizando como fotocatalizador el  $\text{TiO}_2$ , con el fin de comparar los resultados

con los materiales basados en grafeno (MBG). En este análisis, se calcularon los valores promedio, máximo, mínimo y la desviación estándar del porcentaje de remoción. Posteriormente, se elaboraron Boxplots para comparar y contrastar los datos de porcentaje de remoción entre ambos colorantes obtenidos mediante el uso de los materiales basados en grafeno y  $\text{TiO}_2$ .

En cumplimiento con el segundo objetivo, se calcularon los valores promedio, máximo, mínimo y la desviación estándar correspondientes a la cinética de degradación. Se realizó una comparación entre ambos colorantes, así como entre los fotocatalizadores estudiados mediante gráficos Boxplot. Por otro lado, para el tercer objetivo específico, se elaboraron igualmente gráficos Boxplot para ilustrar los niveles de porcentaje de remoción alcanzados con diferentes fuentes de luz para cada colorante. Este análisis permitió determinar el tipo de luz más utilizado en el proceso de fotocatalisis heterogénea, tanto para la degradación del Rojo Congo como del Verde Malaquita. Asimismo, permitió determinar la longitud de onda más adecuada para el tratamiento de estos contaminantes y evaluar si el uso de fuentes de luz artificiales resulta más conveniente que el de fuentes naturales. El uso de los gráficos Boxplot ayudó a identificar visualmente el promedio de valores obtenidos para cada variable, así como la detección de valores atípicos fuera de los cuartiles 1 y 4, los cuales serán analizados en la sección de Discusión. Finalmente, el flujograma asociado a esta etapa se presenta en la **Figura 6**.



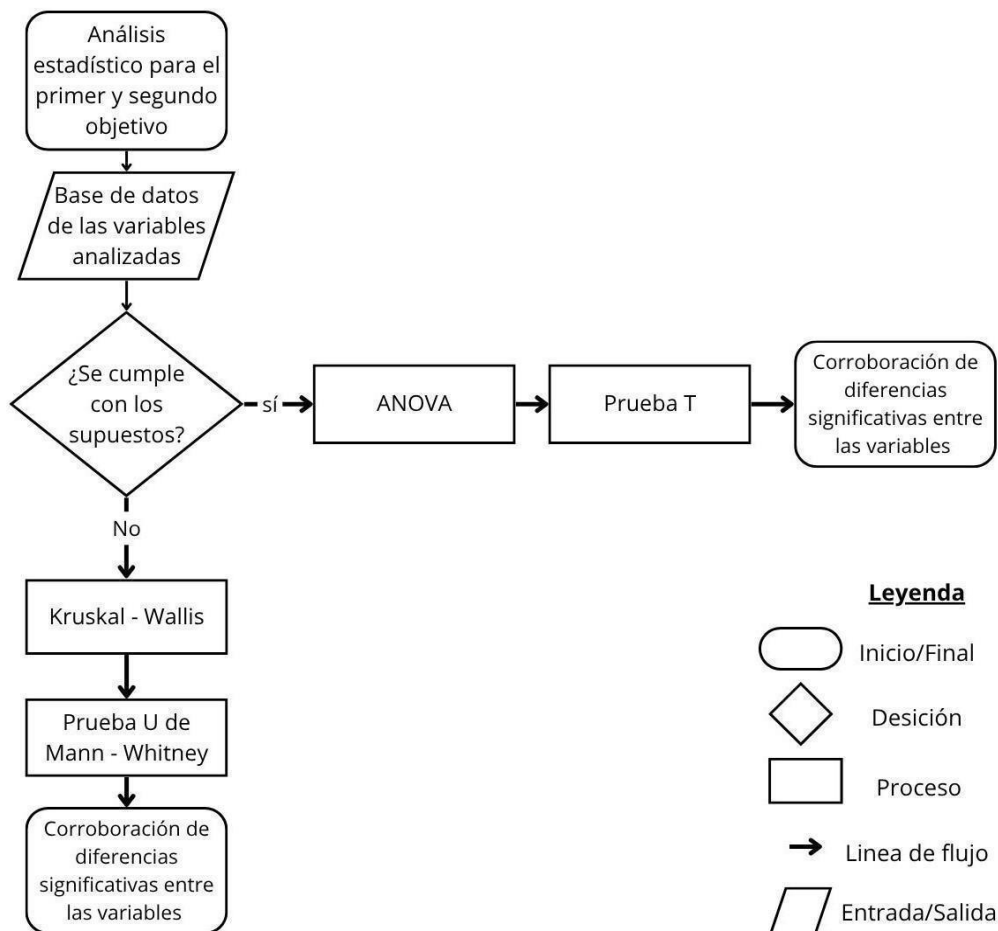
**Figura 6.** Diagrama de flujo del análisis descriptivo. **Fuente:** Elaboración propia.

Una vez finalizado el análisis descriptivo, se inició el análisis estadístico. Se utilizaron los softwares *Origin (versión 8)* y *Stata (versión 18)* para examinar los datos recopilados y realizar pruebas de validación estadística, las cuales se estructuraron en dos fases:

La primera fase se enfocó en abordar el primer objetivo, que consistió en comparar estadísticamente los valores de eficiencia de remoción según el tipo de colorante. Para ello, primero se evaluaron los supuestos necesarios para seleccionar la prueba estadística adecuada. Luego de comprobar el cumplimiento de los supuestos, se aplicó la prueba ANOVA; de lo contrario, se empleó la prueba Kruskal-Wallis. Estas pruebas permitieron determinar si existían diferencias significativas en la eficiencia de remoción entre los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita. Posteriormente, para identificar

diferencias específicas entre los grupos analizados, se aplicó la prueba T o la prueba de U de Mann-Whitney, según los resultados obtenidos en el análisis estadístico preliminar.

El segundo objetivo específico se abordó mediante un análisis estadístico para evaluar la asociación entre las variables “cinética de degradación” y “tipo de colorante”. Dado que la primera variable es numérica y la segunda categórica, se verificaron previamente los supuestos estadísticos necesarios para elegir la prueba adecuada. Si se cumplían estos supuestos, se aplicaba la prueba ANOVA; de lo contrario, se utilizaba la prueba Kruskal-Wallis. Estas pruebas permitieron determinar si existían diferencias significativas en la cinética de degradación entre los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita. Luego, para identificar diferencias entre los grupos específicos, se aplicó la prueba T o la de U de Mann-Whitney, según correspondiera. La **Figura 7** presenta el diagrama de flujo que resume el análisis estadístico realizado en ambas fases.

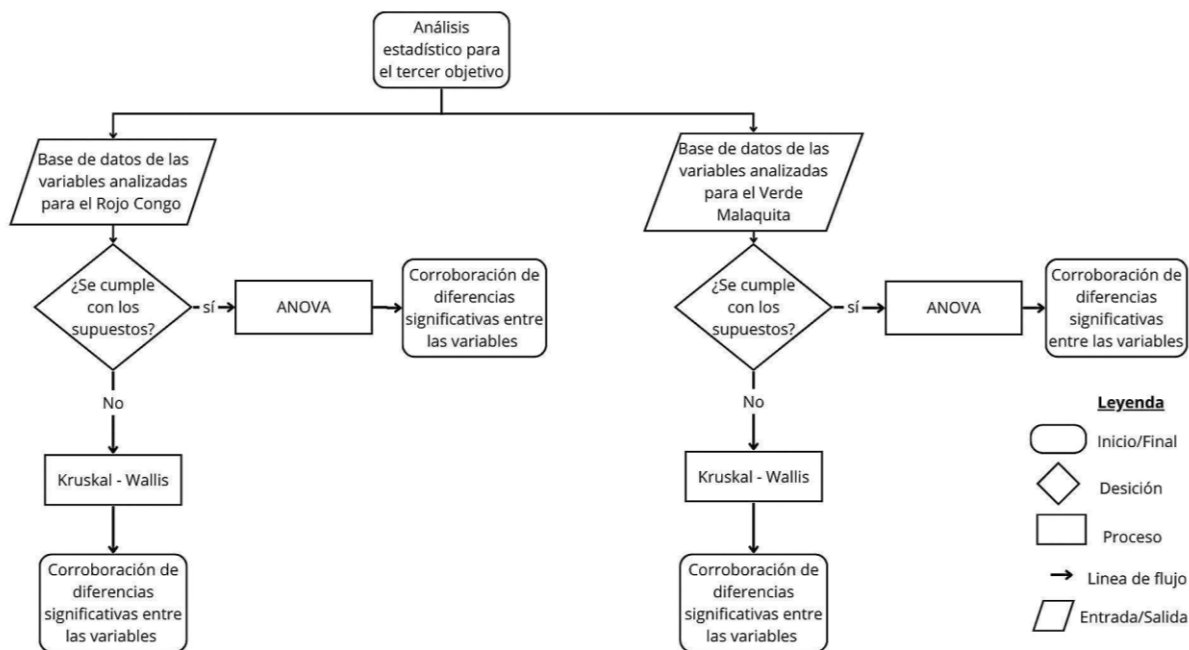


**Figura 7.** Diagrama de flujo de la primera y segunda fase del análisis estadístico.

**Fuente:** Elaboración propia.

*Nota.* Los supuestos considerados para este análisis son: muestreo aleatorio, observaciones independientes, normalidad y homocedasticidad.

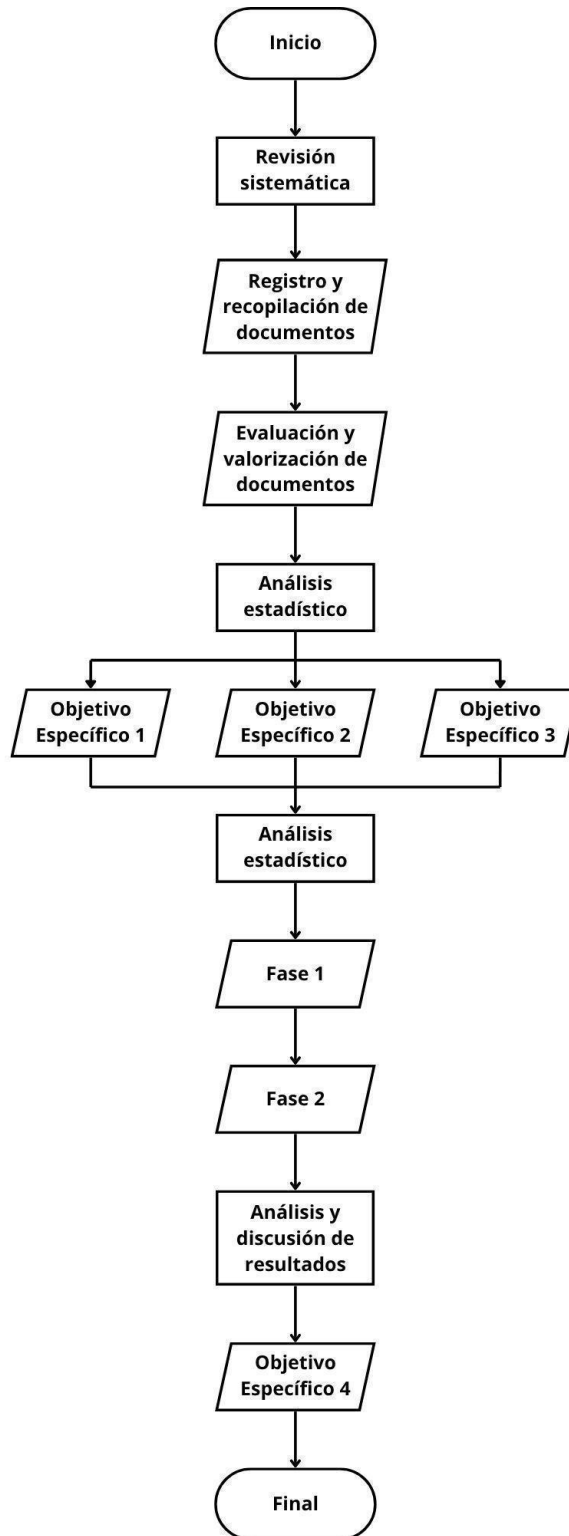
Por último, se abordó el tercer objetivo específico mediante un análisis estadístico para comparar la variable eficiencia de remoción en función de la fuente de luz, tanto para el colorante Rojo Congo como para el Verde Malaquita. Para ello, se verificaron previamente los supuestos requeridos por la prueba estadística seleccionada. En caso de que dichos supuestos se cumplieran, se aplicó la prueba ANOVA; de lo contrario, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Estas pruebas permitieron evaluar la relación entre la fuente de luz y la eficiencia de remoción de ambos colorantes. El diagrama de flujo correspondiente a esta fase del análisis estadístico se presenta en la **Figura 8**.



**Figura 8.** Diagrama de flujo de la tercera fase del análisis estadístico. **Fuente:** Elaboración propia.

*Nota.* Los supuestos considerados para este análisis son: muestreo aleatorio, observaciones independientes, normalidad y homocedasticidad.

Concluidas las fases del análisis estadístico, se procedió al análisis y discusión de los resultados para la elaboración del borrador final de la tesis. En esta etapa, se realizaron búsquedas de información y actividades complementarias necesarias para alcanzar el cuarto objetivo específico, tomando en cuenta los resultados obtenidos en los tres objetivos anteriores. En caso de no encontrarse diferencias significativas entre los resultados, se incorporaron variables adicionales para fortalecer el análisis y cumplir con este último objetivo, entre ellas el tipo de colorante, tal como se mencionó previamente, así como el tipo de fotocatalizador empleado y el tiempo de reacción. La **Figura 9** presenta un diagrama de flujo que resume todas las actividades realizadas a lo largo del proyecto.



**Figura 9.** Diagrama de flujo de las actividades de la tesis. **Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.4. Análisis de la información

##### i. Operacionalización de variables

| Variable                              | Definición Conceptual  | Definición Operacional   | Indicadores                                  | Tipo y escala                        | Rango   |
|---------------------------------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Eficiencia de remoción fotocatalítica | La eficiencia de remoción fotocatalítica se refiere a la capacidad de eliminar contaminantes, como los tintes sintéticos, mediante el uso de grafeno activado bajo la irradiación de luz específica [65][66][67].  | La eficiencia de remoción fotocatalítica se determinó un análisis estadístico de los porcentajes de remoción recopilados de la base de datos de estudios experimentales previos.   | Porcentaje de degradación                    | Numérica continua, %                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción alta u óptima: 80-100%</li> <li>- Remoción Media o buena: 66.4-80%</li> <li>- Remoción baja: 46-66.4%</li> </ul>  |
| Cinética de degradación               | Se refiere a la velocidad de degradación de los tintes sintéticos, que describe cómo varía la concentración de estos contaminantes a lo largo del tiempo en presencia de un fotocatalizador como el grafeno, bajo una fuente de luz específica [68][69]. | Se determinó a partir de la comparación estadística de las constantes de velocidad de degradación en experimentos previos.   | Constante de la velocidad de degradación (k) | Numérica continua, min <sup>-1</sup> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad alta u óptima: 0.03-0.385 min<sup>-1</sup></li> <li>- Velocidad Media o buena: 0.009-0.03 min<sup>-1</sup></li> <li>- Velocidad baja: &lt; 0.009 min<sup>-1</sup></li> </ul>   |
| Fuente de luz                         | La fuente de luz se define como un sistema que emite radiación electromagnética, la cual puede ser luz ultravioleta, visible o solar. Esta radiación se emplea para activar el fotocatalizador e iniciar las reacciones químicas durante el proceso de   | Se compararon los diferentes valores categorizados de longitud de onda de las diversas fuentes de luz utilizadas en la degradación de colorantes. El objetivo de este análisis es determinar cuál de estas fuentes de luz logra los mayores porcentajes de remoción de | Tipo de luz                                  | Categórica nominal                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Luz Ultravioleta (UV) artificial Rango de longitud de onda: 10 nm - 400 nm</li> <li>- Luz visible natural y artificial Rango de longitud de onda: 400 nm - 700 nm</li> <li>- Luz Solar natural Rango de longitud de</li> </ul> |

|                    |   |  |                        |                  |                              |
|--------------------|---|--|------------------------|------------------|------------------------------|
|                    | remoción de colorantes [70][71].  | colorantes, mediante herramientas de análisis estadístico para validar los resultados obtenidos.   |                        |                  | onda: 300 nm - 2500 nm       |
| Tipo de colorantes | Los colorantes desempeñan un papel crucial en la contaminación de los cuerpos de agua, y su impacto ambiental varía según el tipo de colorante utilizado en la industria textil [72]. | Se realizó una comparación estadística de la eficiencia de remoción de los colorantes elegidos por su impacto ambiental en el sector textil, Rojo Congo y Verde Malaquita, utilizando datos obtenidos a través de la revisión bibliográfica. | Colorantes específicos | Catórica nominal | Rojo Congo y Verde Malaquita |

**Tabla 5.** Tabla de Operacionalización de variables - **Fuente:** Elaboración propia

## ii. Desarrollo del proceso de análisis

El proceso de análisis se desarrolló inicialmente mediante un enfoque descriptivo, aplicándose tanto a los objetivos específicos como al objetivo general del estudio. Este enfoque implicó la recopilación sistemática de datos que permitieran caracterizar en profundidad el proceso de la fotocatalisis heterogénea, así como sus componentes y variables. La interpretación detallada de la información compilada fue fundamental en esta fase.

Para el primer objetivo específico, que consiste en determinar la eficiencia del proceso de fotocatalisis heterogénea en la remoción de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita, se realizó una caracterización ordenada de los datos. Esto facilitó la interpretación de los valores obtenidos, en función de los rangos establecidos durante la operacionalización de variables. La información fue estructurada mediante tablas que facilitaron la comparación de eficiencias entre ambos colorantes y con el TiO<sub>2</sub> como compuesto de referencia.

Para abordar los demás objetivos específicos, se utilizaron documentos

científicos obtenidos luego de las dos primeras etapas de la revisión sistemática, enfocándose en la variable correspondiente a cada objetivo. En lugar de realizar predicciones, el enfoque se orientó hacia la comprensión del mecanismo del proceso de tratamiento y sus posibles variaciones, basándose en los datos existentes. Las tablas elaboradas en el análisis descriptivo, junto con los gráficos Boxplots generados mediante los softwares Origin y Stata, permitieron visualizar los valores promedios, máximos y mínimos, así como la desviación estándar de cada variable. Este enfoque facilitó una comparación exhaustiva de los resultados obtenidos para cada colorante.

Este trabajo de tesis adoptó un enfoque exploratorio, centrándose en el análisis estadístico para facilitar la identificación y comprensión de las relaciones entre las variables relevantes del mecanismo de degradación. Este enfoque también apoyó el cumplimiento de cada objetivo específico planteado. Gracias a este método exploratorio, se pudo obtener una validación estadística que corrobora las relaciones entre los datos recopilados para cada variable durante la revisión sistemática. Esta validación se realizó mediante pruebas de correlación y pruebas de diferencia o igualdad, enfocándose en las variables de eficiencia de remoción, cinética de degradación y tipo de luz empleada durante el proceso fotocatalítico.

## **V. RESULTADOS**

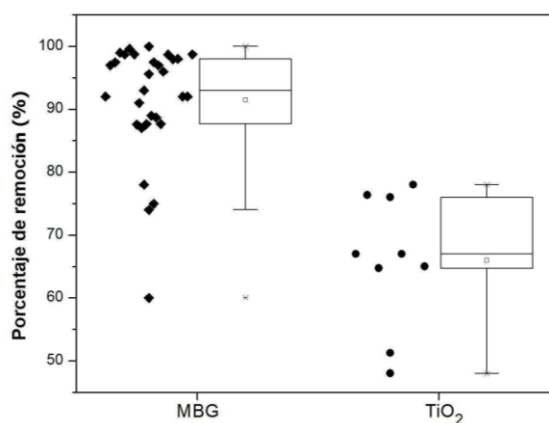
### **5.1. Porcentaje de remoción**

Para alcanzar el primer objetivo específico, se obtuvieron 60 valores de porcentajes de remoción mediante fotocátalisis heterogénea, con 30 valores por colorante. Adicionalmente, se registraron 18 valores correspondientes al uso de  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador, con 9 valores por colorante. Estos datos se detallan en los **ANEXOS 1 y 2** para los MBG y **ANEXOS 3 y 4** para el  $\text{TiO}_2$ . De manera resumida, la información se presenta en la **Tabla 6**.

| Colorante              | Rojo Congo |                  | Verde Malaquita |                  |
|------------------------|------------|------------------|-----------------|------------------|
| Fotocatalizador        | MBG        | TiO <sub>2</sub> | MBG             | TiO <sub>2</sub> |
| Cantidad de documentos | 30         | 9                | 30              | 9                |
| Valor promedio         | 91.49%     | 67.76 %          | 91.14 %         | 63.04 %          |
| Valor máximo           | 100%       | 76.36 %          | 100 %           | 79.4 %           |
| Valor mínimo           | 60%        | 48 %             | 59 %            | 11.87 %          |
| Desviación estándar    | 9.27%      | 9.67 %           | 10.63 %         | 21.38 %          |

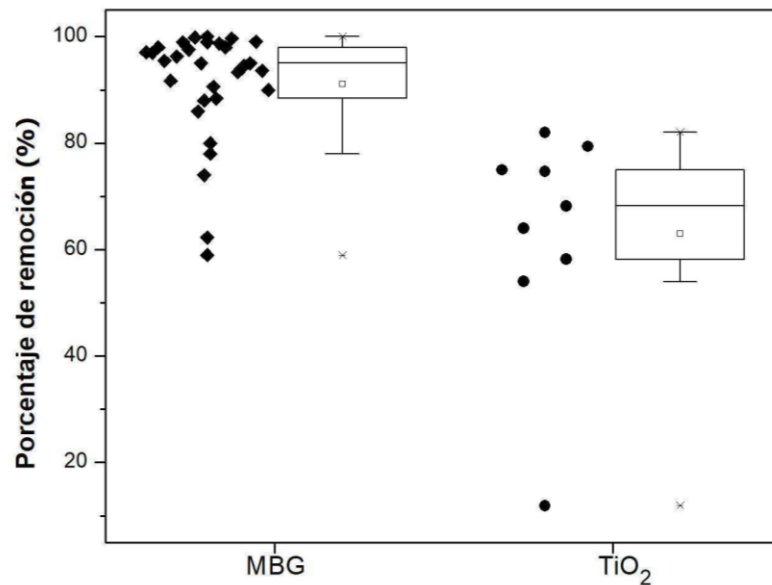
**Tabla 6.** Valores promedio, máximo, mínimo y desviación estándar de los valores de porcentaje de remoción recopilados para el CR y MG.

En la **Figura 10** se puede apreciar que los MBG alcanzan un mayor y más variable porcentaje de remoción, con una mediana cercana al 90%, indicando un alto porcentaje de remoción promedio. Sin embargo, se identifican algunos datos en el extremo de los valores de menor % de remoción así como un valor atípico cuyo porcentaje de remoción es cercano al 60%. Por otra parte, el TiO<sub>2</sub> muestra un menor desempeño en la remoción, con una mediana en torno al 60%. Aunque presenta una menor dispersión dentro del rango intercuartílico, igualmente se observan algunos valores fuera de este.



**Figura 10.** Comparación entre los valores de remoción correspondientes al Rojo Congo obtenidos mediante el empleo de MBG y TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores.

En la **Figura 11**, los MBG presentan una mediana de remoción cercana al 90%, indicando un alto rendimiento de remoción en la mayoría de los casos analizados, con una menor variabilidad dentro del rango intercuartílico. En contraste, el TiO<sub>2</sub> muestra una mediana alrededor del 60%, lo que evidencia un rendimiento más bajo que los MBG. Además, su rango intercuartílico es ligeramente más amplio, lo que muestra una mayor variabilidad en los resultados obtenidos con este fotocatalizador.



**Figura 11.** Comparación entre los valores de remoción correspondientes al Verde Malaquita obtenidos mediante el empleo de MBG y TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores.

Debido a que se encontraron diferencias entre los porcentajes de remoción utilizando diferentes fotocatalizadores para ambos colorantes, se inició la primera fase de la prueba estadística para determinar si estas diferencias son significativas. Para ello, se inició con la evaluación de supuestos, analizando la distribución normal de la variable numérica “porcentaje de remoción” en relación con la variable categórica “fotocatalizador” para el colorante Rojo Congo. En el **ANEXO 5**, se presentaron medidas descriptivas como la media y

mediana (p50), las cuales mostraron valores cercanos entre sí. Sin embargo, los histogramas ilustraron una distribución no normal (ver **ANEXO 6**). Posteriormente, en el **ANEXO 7**, se realizó la prueba estadística de Shapiro-Wilk para evaluar la distribución normal de ambas variables. Los resultados indicaron que el p-valor para el fotocatalizador MBG fue menor a 0.05, mientras que, para el TiO<sub>2</sub>, el p-valor fue mayor 0.05. Para completar la evaluación de supuestos, en el **ANEXO 8** se evaluó la homocedasticidad mediante la prueba de Bartlett. Dado que el p-valor fue mayor a 0.05, se concluye que existe homocedasticidad. No obstante, debido a que no hay cumplimiento con el supuesto de normalidad para los MBG, se procedió a realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. En el **ANEXO 9**, se observó que el p-valor obtenido en la prueba de Kruskal-Wallis fue menor a 0.05, lo que llevó al rechazo de la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa. Esto sugiere que existen diferencias significativas entre los porcentajes de remoción del Rojo Congo al emplear MBG y TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores. Para corroborar estos resultados, se aplicó la prueba de U de Mann-Whitney. La **Figura 12** muestra que el p-valor fue inferior a 0.05, confirmando el rechazo de la hipótesis nula. Esto reafirma que existen diferencias significativas entre los porcentajes de remoción del colorante Rojo Congo al comparar el uso de MBG y TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores.

**Prueba de suma de rangos de Wilcoxon de dos muestras  
( U de Mann-Whitney)**

| fotocatalizador  | Obs       | Suma de rangos | Esperado   |
|------------------|-----------|----------------|------------|
| MBG              | <b>30</b> | <b>721.5</b>   | <b>600</b> |
| TiO <sub>2</sub> | <b>9</b>  | <b>58.5</b>    | <b>180</b> |
| Combinados       | <b>39</b> | <b>780</b>     | <b>780</b> |

H<sub>0</sub>: p\_remoción(fotocatalizador==MBG) = p\_remoción(fotocatalizador==TiO<sub>2</sub>)

$$z = 4.052$$

$$\text{Prob} > |z| = 0.0001$$

**Figura 12.** Prueba de U de Mann-Whitney de las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del Rojo Congo.

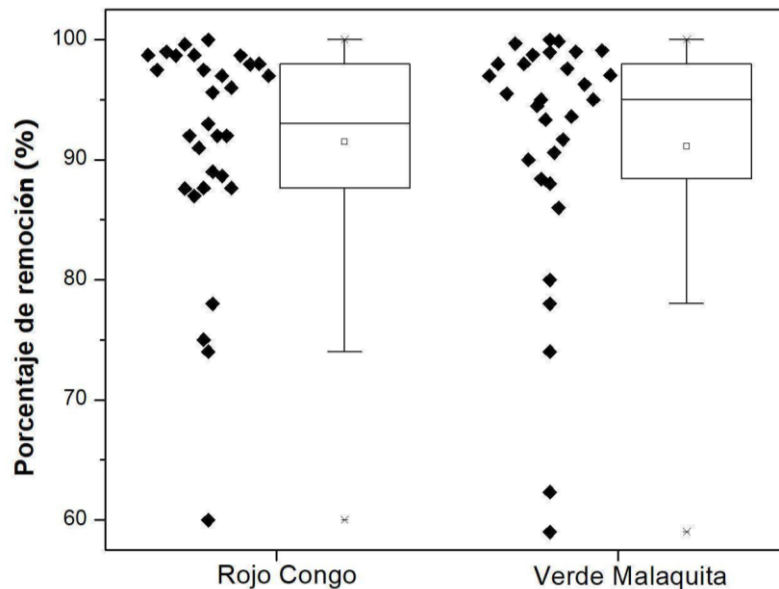
Una vez finalizada la primera fase del análisis estadístico, se procedió a evaluar la distribución normal de la variable numérica “porcentaje de remoción” en relación con la variable categórica “fotocatalizador”, esta vez para el colorante Verde Malaquita. Para ello, se utilizaron las mismas pruebas estadísticas realizadas previamente para la evaluación de los supuestos. En el **ANEXO 10**, las medidas descriptivas del porcentaje de remoción en función del fotocatalizador mostraron diferencias considerables entre sí. Además, los histogramas (**ANEXO 11**) evidenciaron que la distribución de los datos no seguía una curva normal, ya que ambas gráficas presentaron campanas de Gauss incompletas. Posteriormente, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk (**ANEXO 12**) para evaluar la normalidad de la distribución en ambas variables, obteniéndose un p-valor menor a 0.05, lo que indica que no se cumple con el supuesto de normalidad. Asimismo, en el **ANEXO 13**, se realizó la prueba de homocedasticidad, obteniendo un p-valor también menor a 0.05, lo que confirma la ausencia de homocedasticidad en los datos. Debido a que no se cumplieron los supuestos necesarios para pruebas paramétricas, se optó por la prueba de Kruskal-Wallis (**ANEXO 14**), cuyo resultado arrojó un p-valor menor a 0.05. Esto permitió concluir que existen diferencias significativas entre los porcentajes de remoción del Verde Malaquita utilizando como fotocatalizadores MBG y  $\text{TiO}_2$ . Para corroborar este resultado, se aplicó la prueba de U de Mann-Whitney, cuyos resultados se muestran en la **Figura 13**. Los resultados confirman la existencia de diferencias significativas en la eficiencia de remoción del colorante al emplear los fotocatalizadores mencionados.

| Prueba de suma de rangos de Wilcoxon de dos muestras<br>( U de Mann-Whitney) |     |                |          |
|--|-----|----------------|----------|
| fotocatalizador  | Obs | Suma de rangos | Esperado |
| MBG  | 30  | 716            | 600      |
| TiO2   | 9   | 64             | 180      |
| Combinados   | 39  | 780            | 780      |

H0:  $p_{\text{remoción}}(\text{fotocatalizador}=\text{MBG}) = p_{\text{remoción}}(\text{fotocatalizador}=\text{TiO2})$   
 $z = 3.867$   
Prob > |z| = 0.0001

**Figura 13.** Prueba de U de Mann-Whitney de las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del Verde Malaquita.

La **Figura 14** presenta un boxplot que ilustra los diferentes porcentajes de remoción para cada colorante. En ambos casos, se observa que el 25% de los porcentajes de remoción superan el 95%. Asimismo, la mediana de ambos colorantes se encuentra alrededor del 90%, indicando que el 50% de los valores de remoción se sitúan por debajo de este porcentaje. Es relevante señalar que, ambos colorantes presentan porcentajes de remoción cercanos a la zona de valores más bajos del boxplot, así como valores atípicos (*outliers*), siendo estos ligeramente más numerosos en el caso del Verde Malaquita.



**Figura 14.** Porcentajes de remoción de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita empleando materiales basados en grafeno.

Para determinar la ausencia de diferencias significativas, se inició nuevamente la fase de prueba estadística, mediante la evaluación de los supuestos. En el **ANEXO 15** se muestran las medidas descriptivas del porcentaje de remoción según el tipo de colorante. Se observó una discrepancia entre la mediana (p50) y la media, además de una distribución no normal en los histogramas del **ANEXO 16**. Para confirmar la normalidad de la variable “porcentaje de remoción” en función de la variable “tipo de colorante”, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk. Los resultados, presentados en el **ANEXO 17**, muestran un p-valor inferior a 0.05, indicando que la variable no sigue una distribución normal. Por otro lado, la prueba de homocedasticidad mostró un p-valor superior a 0.05, concluyendo que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas (ver **ANEXO 18**). Dado que no se cumplieron el total de supuestos para una prueba paramétrica, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis. Como se muestra en el **ANEXO 19**, el p-valor obtenido fue mayor a 0.05, lo que sugiere que no hay una asociación significativa entre el porcentaje de remoción y el tipo de colorante. Este resultado fue corroborado mediante la prueba U de Mann-Whitney, mostrado en la **Figura 15**, donde el p-valor obtenido también fue superior a 0.05,

reafirmando que no existen diferencias significativas entre los porcentajes de remoción de ambos colorantes.

| Prueba de suma de rangos de Wilcoxon de dos muestras<br>(U de Mann-Whitney) |     |                |          |
|---|-----|----------------|----------|
| colorante   | Obs | Suma de rangos | Esperado |
| rojo congo  | 30  | 897            | 915      |
| Verde malaquita   | 30  | 933            | 915      |
| Combinados  | 60  | 1830           | 1830     |

H0:  $p_{\text{remoción}}(\text{colorante}=\text{rojo Congo}) = p_{\text{remoción}}(\text{colorante}=\text{verde malaquita})$   
 $z = -0.266$   
 Prob >  $|z| = 0.7901$

**Figura 15.** Prueba de U de Mann-Whitney de las variables porcentaje de remoción y tipo de colorante.

## 5.2. Cinética de degradación

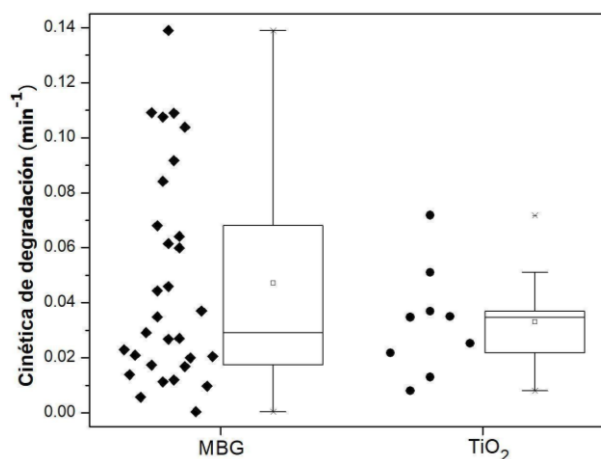
Para abordar el segundo objetivo específico, los datos recopilados se presentan en los **ANEXOS 1 y 2**. Adicionalmente, se registraron otros 18 datos correspondientes al uso de  $\text{TiO}_2$  en el mismo proceso, con nueve valores para cada colorante, los cuales se encuentran en los **ANEXOS 3 y 4**. En la **Tabla 7**, se realizaron comparaciones entre los valores de cinética obtenidos para el Rojo Congo y el Verde Malaquita, empleando diferentes fotocatalizadores. Estas comparaciones se ilustran gráficamente en las **Figuras 16 y 17**, respectivamente.

| Colorante              | Rojo Congo              |                         | Verde Malaquita         |                          |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
|                        | MBG                     | $\text{TiO}_2$          | MBG                     | $\text{TiO}_2$           |
| Cantidad de documentos | 30                      | 9                       | 30                      | 9                        |
| Valor promedio         | $0.05 \text{ min}^{-1}$ | $0.03 \text{ min}^{-1}$ | $0.10 \text{ min}^{-1}$ | $0.003 \text{ min}^{-1}$ |

| Colorante           | Rojo Congo                |                          | Verde Malaquita          |                          |
|---------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Valor máximo        | 0.139 min <sup>-1</sup>   | 0.0718 min <sup>-1</sup> | 0.4578 min <sup>-1</sup> | 0.078 min <sup>-1</sup>  |
| Valor mínimo        | 0.00037 min <sup>-1</sup> | 0.008 min <sup>-1</sup>  | 0.0013 min <sup>-1</sup> | 0.0016 min <sup>-1</sup> |
| Desviación estándar | 0.04 min <sup>-1</sup>    | 0.02 min <sup>-1</sup>   | 0.12 min <sup>-1</sup>   | 0.03 min <sup>-1</sup>   |

**Tabla 7.** Valores promedio, máximo, mínimo y desviación estándar de los valores de cinética de degradación recopilados para el CR y MG.

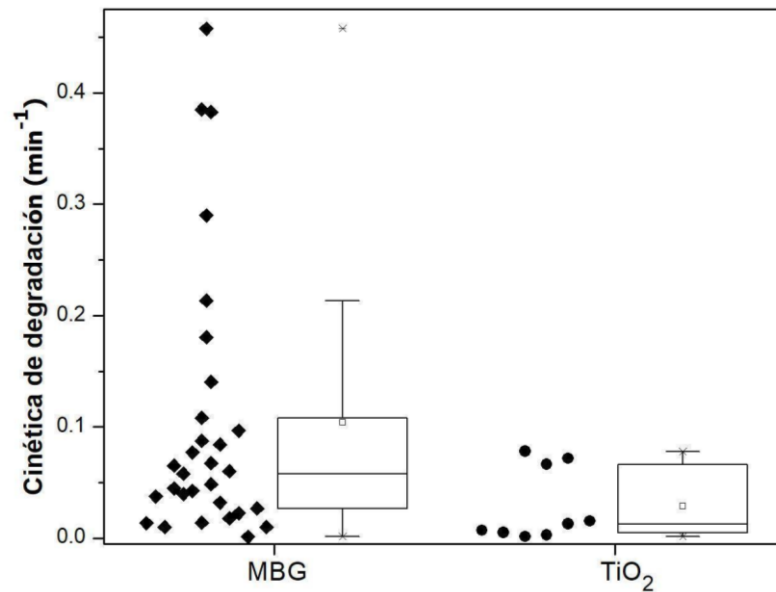
En la **Figura 16** se aprecia que los MBG poseen una mediana superior, cercana a 0.03 min<sup>-1</sup>, en comparación con el TiO<sub>2</sub>, cuya mediana se aproxima a 0.01 min<sup>-1</sup>. Esto indica que los MBG presentan una mayor tasa de degradación. Sin embargo, también exhiben mayor dispersión en los datos, sugiriendo variabilidad en su desempeño. Por otra parte, el TiO<sub>2</sub> muestra una distribución más estrecha y consistente, reflejando un rendimiento más uniforme pero menos eficiente en la degradación.



**Figura 16.** Comparación entre los valores de la cinética de remoción para el Rojo Congo, empleando MBG y TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores.

La **Figura 17** muestra que los MBG presentan una cinética de degradación más rápida que el TiO<sub>2</sub>. No obstante, es importante señalar que los MBG también exhiben una mayor dispersión y valores significativos por encima del cuarto cuartil, lo que indica que su eficacia no es consistente. En contraste, el TiO<sub>2</sub> muestra una cinética de degradación más lenta, pero estable, con menor

variabilidad y pocos valores extremos. Esto sugiere que, aunque su rendimiento es más predecible, su eficiencia es inferior.



**Figura 17.** Comparación entre los valores de la cinética de remoción para el Verde Malaquita, empleando MBG y TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores.

Debido a las incertidumbres en las diferencias entre las cinéticas de reacción al utilizar MBG y al TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores para ambos colorantes, se inició la primera fase de la prueba estadística con la evaluación de supuestos. En esta etapa, se analizaron la normalidad y la homocedasticidad. En el **ANEXO 20**, las medidas descriptivas de ambas variables muestran una ligera concordancia, lo que sugiere que la variable “cinética de reacción” podría seguir una distribución normal en función de los fotocatalizadores evaluados. Posteriormente, en el **ANEXO 21**, el análisis de histogramas también indicó una distribución normal. Para confirmar este supuesto, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (**ANEXO 22**), obteniéndose un p-valor menor a 0.05 para MBG y mayor a 0.05 para TiO<sub>2</sub>, lo que no indica que las variables analizadas no siguen una distribución normal. Para concluir la evaluación de supuestos, la prueba de homocedasticidad (**ANEXO 23**) arrojó un p-valor menor a 0.05, lo que sugiere que no se cumple este supuesto. En vista que no hay cumplimiento en ninguno de los supuestos, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis (**ANEXO 24**), obteniendo un p-valor mayor

a 0.05. Este resultado señala que no existen diferencias significativas entre las cinéticas de degradación del Rojo Congo al emplear los MBG y TiO<sub>2</sub> como fotocatalizadores. Finalmente, en la **Figura 18**, se empleó la prueba de U de Mann-Whitney para corroborar los resultados, obteniendo un p-valor superior a 0.05. Esto confirma que no hay diferencias significativas entre las cinéticas de degradación del colorante Rojo Congo al utilizar como fotocatalizadores los MBG y TiO<sub>2</sub>.

| <b>Prueba de suma de rangos de Wilcoxon de dos muestras<br/>( U de Mann-Whitney)</b> |            |                       |                 |
|--|------------|-----------------------|-----------------|
| <b>fotocatalizador</b>   | <b>Obs</b> | <b>Suma de rangos</b> | <b>Esperado</b> |
| MBG  | <b>30</b>  | <b>616</b>            | <b>600</b>      |
| TiO2   | <b>9</b>   | <b>164</b>            | <b>180</b>      |
| Combinados   | <b>39</b>  | <b>780</b>            | <b>780</b>      |

H0:  $c_{\text{reacción}}(\text{fotocatalizador}=\text{MBG}) = c_{\text{reacción}}(\text{fotocatalizador}=\text{TiO2})$   
 $z = 0.533$   
 Prob > |z| = 0.5938

**Figura 18.** Prueba de U de Mann-Whitney de las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del Rojo Congo.

Una vez finalizado el análisis estadístico para el Rojo Congo, se analizó la distribución normal de la variable numérica “cinética de reacción” en función de la variable categórica “fotocatalizador” para el Verde Malaquita. En el **ANEXO 25** se presentan las medidas descriptivas del porcentaje de remoción en función del fotocatalizador, donde se evidencia una diferencia notable entre las medianas (p50) y las medias, sugiriendo que la distribución no es normal. El **ANEXO 26** refuerza este hallazgo, ya que los histogramas muestran campanas de Gauss incompletas. Posteriormente, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad en ambas variables, obteniéndose un p-valor menor a 0.05 para la cinética de degradación utilizando ambos fotocatalizadores,

indicando que no hay distribución normal entre ambas variables, ver **ANEXO 27**. Además, en el **ANEXO 28** se muestra el resultado de la prueba de homocedasticidad, donde el p-valor obtenido fue menor a 0.05, concluyendo que no se cumple este supuesto. En vista de que no se cumplen todos los supuestos, se procedió con la prueba de Kruskal-Wallis, la cual arrojó un p-valor menor a 0.05, ver **ANEXO 29**. Esto indica que existen diferencias significativas entre las cinéticas de degradación del colorante Verde Malaquita al emplear diferentes fotocatalizadores.

La **Figura 19** corrobora el resultado obtenido mediante la prueba de U de Mann-Whitney, en la cual el p-valor fue menor a 0.05. Esto indica que existen diferencias significativas entre las cinéticas de degradación del colorante Verde Malaquita según el fotocatalizador utilizado.

| <b>Prueba de suma de rangos de Wilcoxon de dos muestras<br/>( U de Mann-Whitney)</b> |            |                       |                 |
|--|------------|-----------------------|-----------------|
| <b>fotocatalizador</b>   | <b>Obs</b> | <b>Suma de rangos</b> | <b>Esperado</b> |
| MBG  | <b>30</b>  | <b>669</b>            | <b>600</b>      |
| TiO2   | <b>9</b>   | <b>111</b>            | <b>180</b>      |
| Combinados   | <b>39</b>  | <b>780</b>            | <b>780</b>      |

H0: c\_reacción(fotocatalizador==MBG) = c\_reacción(fotocatalizador==TiO2)

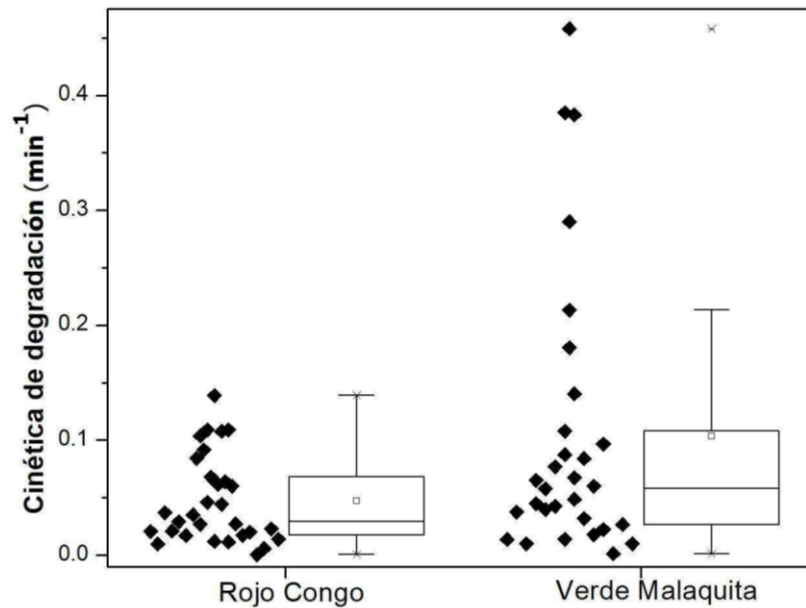
z = **2.300**

Prob > |z| = **0.0214**

**Figura 19.** Prueba de U de Mann-Whitney de las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del Verde Malaquita.

Por otro lado, en la **Figura 20** se presenta un boxplot que ilustra los valores de la cinética de remoción alcanzados para los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita empleando materiales basados en grafeno como fotocatalizadores. Este gráfico permite visualizar que el Rojo Congo presenta una cinética de degradación baja pero consistente, con poca variabilidad y prácticamente

ningún valor por encima del cuarto cuartil. En contraste, el Verde Malaquita, aunque tiene una mediana similar, presenta una mayor dispersión y un mayor número de valores por encima del cuarto cuartil.



**Figura 20.** Diagrama de caja de los valores de cinética de degradación del Rojo Congo y Verde Malaquita empleando materiales basados en grafeno.

Luego de comparar las cinéticas de reacción entre ambos colorantes, se realizó una segunda prueba estadística, en la que fue fundamental reevaluar los supuestos. En el **ANEXO 30** se observa que las medias y medianas ( $p_{50}$ ) de los colorantes difieren, lo que indica que la variable cinética de degradación no sigue una distribución normal. Para complementar este análisis, los histogramas presentados en el **ANEXO 31** muestran una distribución asimétrica en forma de campana de Gauss para ambos colorantes. Además, la prueba de Shapiro-Wilk arrojó un  $p$ -valor inferior a 0.05, concluyendo que los datos no siguen una distribución normal (ver **ANEXO 32**). La evaluación de homocedasticidad también mostró un  $p$ -valor inferior a 0.05, indicando que no existe homogeneidad de varianzas entre los grupos analizados (ver **ANEXO 33**). Dado que no se cumplieron estos dos supuestos fundamentales, se optó por utilizar la prueba de Kruskal-Wallis como alternativa. Los resultados obtenidos (**ANEXO**

34) mostraron un p-valor superior a 0.05, donde se concluye que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las cinéticas de reacción de ambos colorantes. Finalmente, se realizó nuevamente la prueba U de Mann-Whitney como método complementario de análisis. En la **Figura 21** se muestra que el p-valor fue superior al 0.05, indicando que no se identifican diferencias significativas en las cinéticas de reacción de los dos colorantes evaluados.

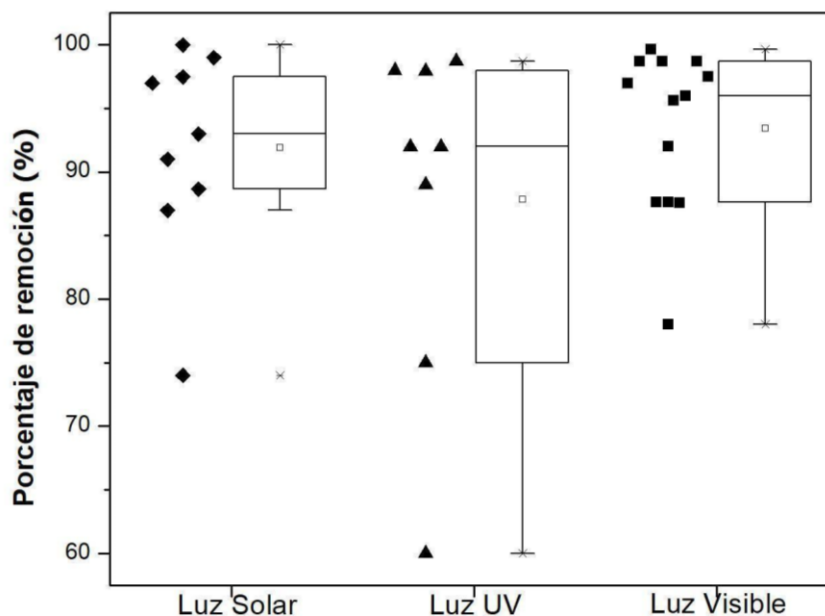
| Prueba de suma de rangos de Wilcoxon de dos muestras<br>(U de Mann-Whitney) |     |                |          |
|---|-----|----------------|----------|
| colorante   | Obs | Suma de rangos | Esperado |
| rojo congo  | 30  | 799            | 915      |
| Verde malaquita   | 30  | 1031           | 915      |
| Combinados  | 60  | 1830           | 1830     |

H0:  $c_{\text{reacción}}(\text{colorante} == \text{rojo Congo}) = c_{\text{reacción}}(\text{colorante} == \text{verde malaquita})$   
 $z = -1.715$   
 Prob > |z| = 0.0863

**Figura 21.** Prueba de U de Mann Whitney de las variables cinética de reacción y tipo de colorante.

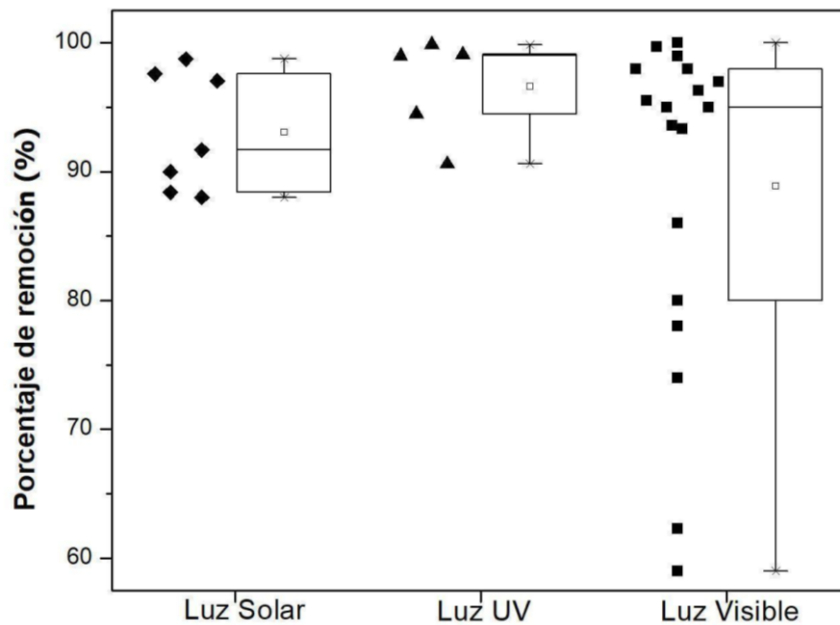
### 5.3. Fuente de luz

Para abordar el tercer objetivo específico, en los **ANEXOS 1 y 2** se recopilieron las distintas fuentes de luz empleadas en el proceso de fotocatalisis heterogénea, junto con sus respectivas longitudes de onda. La **Figura 22** analiza la distribución de los porcentajes de remoción, observándose que las fuentes de luz de origen natural, solar y visible presentan una mayor consistencia, con valores concentrados alrededor del 90-95%. En contraste, la luz UV artificial exhibe una mayor variabilidad en la remoción, con un rango que oscila aproximadamente entre el 60% y el 100%.



**Figura 22.** Comparación de los porcentajes de remoción promedios alcanzados por los diferentes tipos de luz para la degradación del Rojo Congo.

La **Figura 23** revela que, en el caso del Verde Malaquita, los valores de remoción recopilados para la luz solar y la luz UV presentan una distribución más consistente, con porcentajes generalmente superiores al 90%. Este patrón sugiere una mayor estabilidad y eficacia en la degradación del colorante cuando se emplean estas fuentes de luz. Por otro lado, la luz visible muestra una mayor dispersión en los porcentajes de remoción, con algunos valores por debajo de su rango intercuartílico.



**Figura 23.** Comparación de los porcentajes de remoción promedios alcanzados por los diferentes tipos de luz para la degradación del Verde Malaquita.

Tras comparar los porcentajes de remoción obtenidos con los tres tipos de luz, se procede a realizar una prueba estadística para evaluar si existen diferencias significativas entre ellos. De acuerdo con el **ANEXO 35**, la mediana (p50) y la media del porcentaje de remoción con luz solar presentan una ligera proximidad, lo que sugiere una distribución más simétrica. En cambio, para los otros tipos de luz, la diferencia entre estos valores es mayor, sugiriendo una distribución asimétrica. Este comportamiento indica que la distribución de datos no es normal cuando se comparan los distintos tipos de luz. La evaluación mediante histogramas (**ANEXO 36**) confirma esta observación, mostrando distribuciones no normales para las tres fuentes de luz. Para verificar la normalidad de datos, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (**ANEXO 37**). Los resultados muestran que, para la luz UV y visible, el p-valor obtenido fue menor a 0.05; lo que indica que los datos no siguen una distribución normal. En el caso de la luz solar, el p-valor fue mayor a 0.05, lo que sugiere que sí cumple con la normalidad. No obstante, dado que en general el p-valor no superó el umbral de 0.05, se concluye que los datos no siguen una distribución normal.

Finalmente, en el **ANEXO 38** se aplicó la prueba de homocedasticidad, obteniendo un p-valor mayor a 0.05, indicando que los datos cumplen con este supuesto. Sin embargo, dado que solo se verificó una de las condiciones necesarias, se procedió a emplear la prueba de Kruskal-Wallis para la comparación de medianas. Como se muestra en la **Figura 24**, los resultados arrojan un p-valor superior a 0.05, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de remoción obtenidos con los tres tipos de luz en la degradación del colorante Rojo Congo.

**Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis**

| luz         | Obs | Suma de rangos |
|-------------|-----|----------------|
| luz UV      | 8   | 111.50         |
| luz solar   | 9   | 139.00         |
| luz visible | 13  | 214.50         |

chi2(2) = 0.420  
Prob = 0.8105

**Figura 24.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables porcentaje de remoción y tipo de luz para la remoción del Rojo Congo.

Posteriormente, se realizó un análisis similar para evaluar la normalidad de la variable numérica “porcentaje de remoción” en función de la variable categórica “tipo de luz” en la degradación del Verde Malaquita. Según las medidas descriptivas presentadas en el **ANEXO 39**, las medianas y medias no muestran cercanía entre sí. Además, los histogramas del **ANEXO 40** exhiben formas de campanas de Gauss incompletas, lo que sugiere que los datos no siguen una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk (**ANEXO 41**) confirmó estas observaciones: para la luz visible, el p-valor fue menor a 0.05; lo que indica una distribución no normal; mientras que, para la luz solar y la luz

UV, el p-valor fue mayor a 0.05, sugiriendo normalidad en estos casos. Dado que no cumple el supuesto de normalidad en todas las categorías, se concluye que la distribución de los datos no es normal. Por último, la prueba de homocedasticidad (**ANEXO 42**) arrojó un p-valor menor a 0.05, lo que indica que los datos no cumplen con este supuesto. En vista de que no hay cumplimiento en ninguno de los supuestos, se realizó la prueba Kruskal-Wallis (**Figura 25**). Los resultados muestran un p-valor superior a 0.05, lo que sugiere que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de remoción obtenidos con las tres fuentes de luz en la degradación del Verde Malaquita.

| <b>Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis</b> |            |                       |
|---|------------|-----------------------|
| <b>luz</b>  | <b>Obs</b> | <b>Suma de rangos</b> |
| <b>luz UV</b>   | <b>5</b>   | <b>106.00</b>         |
| <b>luz solar</b>  | <b>7</b>   | <b>100.00</b>         |
| <b>luz visible</b>  | <b>18</b>  | <b>259.00</b>         |

**chi2(2) = 2.516**  
**Prob = 0.2842**

**Figura 25.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables porcentaje de remoción y tipo de luz para la remoción del Verde Malaquita.

## **VI. DISCUSIÓN**

### **6.1. Factores que afectan el rango de los porcentajes de remoción**

Los resultados obtenidos en relación con el primer objetivo específico indican que los materiales basados en grafeno (MBG) representan una alternativa altamente prometedora para el tratamiento de efluentes de la industria textil. Como se observa en la **Figura 14**, los porcentajes de remoción de colorantes

alcanzados con el uso de MBG como fotocatalizadores varían entre el 90% y casi el 100%, con un valor promedio cercano al 90% para cada colorante, según la **Tabla 6**. Además, las **Figuras 10 y 11** evidencian que estos fotocatalizadores ofrecen una mayor eficiencia en comparación con el  $\text{TiO}_2$ , uno de los fotocatalizadores más utilizados comercialmente.

Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad del grafeno como una opción eficaz para la degradación de colorantes sintéticos y orgánicos, en gran parte gracias a sus destacadas propiedades estructurales y conductoras [54-56]. Por otro lado, el  $\text{TiO}_2$  es ampliamente reconocido por su alta eficiencia como fotocatalizador [41]. Sin embargo, presenta una limitación importante: su activación solo ocurre mediante luz UV, ya que absorbe longitudes de onda menores a 400 nm aproximadamente [141]. Esto restringe su aplicabilidad, dado que la mayor parte de la radiación solar se encuentra fuera de este rango. Por el contrario, los materiales basados en grafeno permiten aprovechar un espectro más amplio de longitudes de onda, lo que diversifica las condiciones de aplicación y posibilita su uso en entornos naturales [53-55]. Por lo tanto, la elección del fotocatalizador es un factor determinante en la eficiencia del proceso de fotocátalisis heterogénea para la eliminación de contaminantes en la industria textil.

Respecto al análisis estadístico, la prueba de U de Mann-Whitney (**Figura 15**) indicó que no existen diferencias significativas entre los porcentajes de remoción del Rojo Congo y del Verde Malaquita. Esto sugiere que los materiales basados en grafeno son igualmente efectivos en la eliminación de ambos contaminantes mediante fotocátalisis heterogénea. Así, la mejor manera de analizar los porcentajes fue comparar el desempeño de cada colorante en función del fotocatalizador utilizado, ya sea el  $\text{TiO}_2$  o los materiales basados en grafeno. Los resultados obtenidos en las **Figuras 12 y 13** confirman que, si bien tanto el  $\text{TiO}_2$  como los materiales basados en grafeno son efectivos en la remoción de estos colorantes, los materiales basados en grafeno son los que demuestran un rendimiento superior. Este hallazgo refuerza la importancia del

tipo de fotocatalizador en la eficiencia del proceso de degradación. En este sentido, los MBG se presentan como una alternativa competitiva respecto al  $\text{TiO}_2$ , debido a las ventajas estructurales y su mayor actividad fotocatalítica, lo que les permite operar en un rango de luz más amplio [44,53,55]. Dichas propiedades refuerzan el potencial del grafeno como un material clave para aplicaciones ambientales. Según Mancilla y col. [142], su estructura molecular única le confiere una alta capacidad para ser utilizado en la detección y monitoreo de contaminantes en suelos y aire. Además, recientes estudios sugieren su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes inorgánicos e industriales, como el Rojo Congo y Verde Malaquita. [142-144]

Más allá de sus ventajas estructurales y de rendimiento, el grafeno también contribuye a la reducción de costos operacionales en los procesos de tratamiento. Su uso como fotocatalizador permite implementar métodos que minimizan la generación de residuos, lo que reduce la necesidad de su disposición final. Como lo explica Friedmann [143], los procesos de fotocátalisis heterogénea no generan lodos residuales que requieran tratamientos adicionales con alta demanda energética. La fotocátalisis heterogénea se distingue por su enfoque ambientalmente sostenible, ya que permite emplear fuentes de energía renovables y accesibles, como lo es la luz solar, reduciendo aún más los costos operativos. Según Faith y col. [144], los materiales basados en grafeno como fotocatalizadores optimizan el aprovechamiento de la luz solar, una fuente de energía limpia y sustentable. Además, el grafeno actúa como un excelente conductor de partículas y energía en su superficie, lo que potencia el desempeño del proceso de fotocátalisis [51,54].

Otro aspecto relevante es la capacidad de reutilización de los materiales basados en grafeno. Mediante la aplicación de diferentes procesos físicos es posible reciclar estos nanomateriales; por ejemplo, la filtración permite recuperar el fotocatalizador para su posterior uso [145], mientras que la centrifugación y la sedimentación facilitan su separación y decantación [146,147]. En estudios como el de Faith y col. [148], el fotocatalizador fue

reutilizado en hasta seis ciclos sin pérdida significativa de eficiencia. De manera similar, Mitra y col. [80] reportaron que el material conservó su rendimiento tras cinco ciclos de uso. Por otro lado, Ramalingam y col. [44] señalaron que esta cifra puede llegar hasta diez ciclos, mientras que Govinda y col. [90] observaron que, tras cuatro ciclos de tratamiento, la eficiencia de remoción del fotocatalizador apenas se redujo del 97.5% inicial a un valor ligeramente inferior al 90%. Estos hallazgos confirman la estabilidad y durabilidad de los materiales basados en grafeno, lo que los convierte en una opción económicamente viable al eliminar la necesidad de reemplazos frecuentes del catalizador.

Todos los aspectos anteriormente mencionados son de gran relevancia, ya que demuestran cómo el grafeno, a pesar de no ser tan comercializado como el  $\text{TiO}_2$  u otros fotocatalizadores, ofrece una amplia gama de beneficios que lo convierten en un material atractivo para su implementación en futuros procesos e instalaciones de tratamiento. En un contexto global donde el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) requiere el compromiso de todas las industrias y sectores comerciales, resulta fundamental considerar las ventajas del grafeno en aplicaciones medioambientales.

El análisis comparativo entre este estudio y otros de temática similar sugiere que los factores determinantes en la fotocatalisis heterogénea no se limitan únicamente a las tres variables consideradas en este trabajo. Al examinar los datos recopilados a través de la revisión sistemática, es posible identificar los porcentajes de remoción más elevados, como los obtenidos para el colorante Rojo Congo en estudios previos [82,86,97], representados en la **Figura 10**. Estos altos valores de remoción corresponden a trabajos en los que se empleó óxido de grafeno reducido (rGO) como fotocatalizador. De manera similar, para el caso del colorante Verde Malaquita, ilustrado en la **Figura 11**, los estudios [102,105,107] reportaron los valores más altos de remoción, también alcanzados mediante el uso de compuestos de rGO. Según Liu y col. [148], el rGO es una variante del grafeno en forma de láminas extremadamente

delgadas, obtenidas mediante procesos de reducción química, electroquímica o térmica del óxido de grafeno. A diferencia del  $\text{TiO}_2$ , que posee una estructura tridimensional, la morfología laminar del rGO le otorga una mayor capacidad para el transporte de electrones a lo largo de su superficie [148, 149]. Además, este material presenta una conductividad térmica y eléctrica superior, atribuida a la reducción de los grupos oxigenados en su estructura molecular, lo que mejora sus propiedades en comparación con el grafeno convencional [149]. Estas propiedades podrían explicar su rendimiento superior en los procesos de fotocatalisis heterogénea para el tratamiento de colorantes, como sugieren los trabajos revisados. Así, se evidencia que la variante de grafeno utilizada influye directamente en los porcentajes de remoción alcanzados, lo que resalta la importancia de una adecuada selección de materiales fotocatalizadores para optimizar la eficiencia del proceso.

En relación con los valores de remoción del Rojo Congo mostrados en la **Figura 10**, se observa que algunos resultados se encuentran por debajo del rango intercuartílico. El valor más bajo fue reportado por Shaalan y col. [76], quienes lograron un 60% de remoción utilizando una heteroestructura basada en grafeno y en óxidos de níquel ( $\text{NiO}$ ) y galio ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) [76]. De manera similar, Rashad y col. [87] emplearon una heteroestructura de grafeno y óxido de cobre, obteniendo un 75% de remoción, porcentaje inferior a los rangos más altos reportados (80% - 95%) para este colorante. Estos resultados sugieren que las heteroestructuras de grafeno con óxidos metálicos podrían no ser la opción más eficiente en la degradación de colorantes. Por otro lado, otros enfoques alternativos también presentaron menores porcentajes de remoción. En el estudio de El-Khawaga y col. [78], se empleó un compuesto de óxido de grafeno combinado con porfirinas, compuestos orgánicos multifuncionales [150], mientras que Fatima y col. [75] utilizaron nanoplaquetas de grafeno con nanopartículas de ferrita de bismuto dopadas. Estos enfoques no lograron superar los valores más altos reportados, lo que podría deberse a que la estructura química del grafeno varía según su posición y configuración, afectando su desempeño en la fotocatalisis heterogénea [151]. Estos hallazgos

refuerzan la hipótesis de que la combinación de grafeno con otros materiales debe seleccionarse cuidadosamente para optimizar la eficiencia del proceso.

En cuanto al Verde Malaquita, la **Figura 11** también muestra valores de remoción por debajo del rango intercuartílico. Un ejemplo es el estudio de Yadav y col. [113], donde el uso de una combinación de ferrita de cobre y óxido de grafeno resultó en un 62.3% de remoción. Este resultado, sumado al caso elaborado por Fatima y col., refuerza la idea de que los óxidos metálicos pueden no ser la mejor opción para procesos de fotocátalisis heterogénea. Asimismo, Mandal y col. [99], reportaron un 59% de remoción utilizando hidroxapatita, un material mineral presente en el tejido óseo de los vertebrados [152]. Al igual que en el estudio de El-Khawaga y col., estos resultados sugieren que la combinación de grafeno con compuestos orgánicos podría no ser la más efectiva en términos de eficiencia de remoción.

A partir de estos casos, se puede inferir que un tercer factor que influye en la eficiencia de la fotocátalisis heterogénea es el tipo de compuesto con el cual interactúa el grafeno. Además, otro aspecto del que también se debe hacer mención respecto a cómo afecta al rendimiento del proceso es la dosis del fotocatalizador. Según Rani y col. [153], la tasa de degradación de los contaminantes puede disminuir cuando la concentración del fotocatalizador es demasiado alta o demasiado baja en relación con la concentración del contaminante. Esto podría explicar la presencia de valores por debajo del primer cuartil en los porcentajes de remoción para ambos colorantes. Por lo tanto, la selección de materiales complementarios para la optimización del proceso de fotocátalisis heterogénea debe realizarse con especial cuidado, asegurando también un equilibrio adecuado entre la concentración del fotocatalizador y la del contaminante, con el fin de evitar variaciones en la eficiencia del tratamiento.

Cabe señalar que el análisis comparativo entre los estudios seleccionados se realizó considerando diversas condiciones operativas, como variaciones en el tipo de luz y el tiempo de tratamiento. Por este motivo, se priorizó la inclusión

de investigaciones que compartieran ciertas similitudes clave, tales como el uso de los materiales basados en grafeno como fotocatalizadores y el tratamiento de los colorantes Rojo Congo y Verde Malaquita. Estas coincidencias permitieron establecer una base común para evaluar los porcentajes de remoción alcanzados, mientras que las diferencias en las condiciones experimentales ofrecieron una perspectiva más amplia de la eficiencia de estos materiales en distintos escenarios, enriqueciendo así la validez del análisis comparativo.

Adicionalmente, debe considerarse que la inclusión de estudios con diferentes matrices acuosas pudo haber introducido cierta incertidumbre en la comparación de resultados. Mientras que algunos trabajos se realizaron en condiciones controladas con soluciones de colorante en agua destilada, otros emplearon matrices más complejas que simulaban efluentes textiles al incorporar compuestos adicionales. Estas diferencias en el medio de reacción pudieron influir en los porcentajes de remoción obtenidos, lo que dificulta en algunos casos la comparación directa; sin embargo, esta diversidad también permitió enriquecer el análisis al ofrecer una visión más amplia del desempeño de los fotocatalizadores tanto en condiciones ideales como en escenarios más cercanos a la realidad.

## **6.2. Factores que afectan la cinética de degradación**

Los resultados obtenidos en relación con el segundo objetivo específico muestran diferencias en la cinética de degradación de los colorantes estudiados al emplearse los materiales basados en grafeno y el  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizadores; sin embargo, al igual que con la variable de irradiancia, se descartó el análisis de la cinética de segundo orden por la limitada disponibilidad de datos, lo que pudo restringir el alcance comparativo del análisis. En este sentido, los valores de velocidad de degradación considerados corresponden únicamente a cinética de primer orden, lo que permitió establecer un marco común de análisis entre los estudios seleccionados.

Como se observa en la **Figura 20**, los valores de cinética de degradación obtenidos al usar los materiales basados en grafeno como fotocatalizadores del proceso varían en un rango de 0.05 a 0.15  $\text{min}^{-1}$ , con valores promedio de 0.05  $\text{min}^{-1}$  y 0.10  $\text{min}^{-1}$ , para el Rojo Congo y Verde Malaquita respectivamente, de acuerdo con la **Tabla 7**. Este rango se considera óptimo de acuerdo con la tabla de operacionalización de variables (**Tabla 5**). Estos resultados sugieren que el uso de los MBG como fotocatalizadores es una alternativa viable para el tratamiento de estos contaminantes mediante fotocátalisis heterogénea, dada la consistencia de los datos obtenidos para ambos colorantes.

Un aspecto relevante es la presencia de valores superiores al cuartil cuatro en la degradación del Verde Malaquita, los cuales superan significativamente el rango óptimo. Algunos estudios, como **[97]** y **[101]**, reportan valores de cinética superiores a 0.4  $\text{min}^{-1}$ . En el primero, se utilizó óxido de grafeno reducido (rGO) para mejorar la eficiencia fotocatalítica, mientras que, en el segundo, se combinó rGO con  $\text{TiO}_2$ . Estos casos destacan la capacidad de los MBG no solo para alcanzar valores elevados de cinética de degradación, sino también para potenciar su rendimiento al combinarse con otros nanomateriales semiconductores, logrando así una mayor eficiencia de remoción **[51]**. Asimismo, el estudio llevado a cabo por Razaq y col. **[154]** sugiere que las propiedades estructurales del rGO pueden aproximarse a las del grafeno prístino, lo que lo convierte en una alternativa prometedora para mejorar las tasas de velocidad de degradación de colorantes orgánicos. Toda esta información nos invita a pensar que al igual que en el caso del porcentaje de remoción, la variante de grafeno empleada influye en la cinética de degradación. Los datos recopilados para el Rojo Congo respaldan esta suposición. En los estudios **[79]** y **[82]**, los valores de cinética superan los 0.1  $\text{min}^{-1}$ , lo que se considera óptimo según la operacionalización de variables. Ambos estudios utilizaron rGO en el proceso de tratamiento, lo que refuerza la importancia de seleccionar la variante de grafeno adecuada. En ese sentido, el óxido de grafeno reducido parece ser la opción más eficiente para la fotocátalisis heterogénea aplicada al tratamiento de efluentes textiles. Otro

aspecto por considerar es el material con el cual se combina el fotocatalizador principal (grafeno), ya que también puede influir en el valor obtenido por este parámetro. Además, aunque el tiempo de tratamiento podría parecer un factor relevante, los resultados de la revisión sistemática no respaldan esta hipótesis. Existen casos en los que tiempos de tratamiento cortos han generado valores de cinética elevados. Por ejemplo, en el estudio realizado por Khan y col. [97], se obtuvo un valor de cinética de  $0.38297 \text{ min}^{-1}$  en 40 minutos. Sin embargo, en otros estudios con el mismo tiempo de tratamiento, los valores de cinética de degradación fueron considerablemente más bajos. Mandal y col. [99] reportaron valores entre  $0.01389 - 0.0874 \text{ min}^{-1}$  en el mismo intervalo de tiempo. De manera similar, en el estudio realizado por Lu y col. [115] se obtuvo un valor de cinética de  $0.2133 \text{ min}^{-1}$  en solo 12 minutos, lo que representa un tiempo significativamente menor al empleado para la obtención de los valores de Mandal, pero con una cinética mucho mayor. Situaciones similares se observan en los valores de cinética de degradación recopilados para el Rojo Congo. En este caso, dos de sus valores más altos,  $0.10755 \text{ min}^{-1}$  y  $0.1038 \text{ min}^{-1}$ , fueron obtenidos en períodos de tiempo de 20 y 34 minutos, respectivamente [80,82]. Estos tiempos son menores al requerido para alcanzar el valor más alto registrado para el Verde Malaquita. Con base en estos datos, se puede concluir que el tiempo no es un factor determinante para obtener valores elevados de cinética de degradación en los procesos de fotocatalisis heterogénea.

Al analizar la influencia del tipo de fotocatalizador empleado, las Figuras 16 y 17 muestran los rangos de cinética de degradación alcanzados para cada colorante mediante el uso de materiales basados en grafeno y el  $\text{TiO}_2$ . Para el caso del Verde Malaquita (Figura 17), se observa que el rango de valores alcanzado con los MBG es considerablemente más amplio que el obtenido con  $\text{TiO}_2$ . Este resultado sugiere que los MBG presentan una ventaja potencial en términos de cinética de degradación. Sin embargo, también indica una mayor variabilidad en su desempeño, lo que podría reflejar una mayor incertidumbre en comparación con el  $\text{TiO}_2$ , cuyos valores son más consistentes.

Por otra parte, al analizar la comparación de la **Figura 16** entre los rangos de cinética de degradación alcanzado para el Rojo Congo, se puede observar que ambos fotocatalizadores presentan rendimientos similares en términos de cinética de degradación, sin diferencias significativas. No obstante, los MBG exhiben un rango de valores más amplio, con mayor variabilidad y la presencia de datos fuera del rango intercuartílico. En contraste, el  $\text{TiO}_2$  muestra un desempeño más estable, con menor incertidumbre en sus resultados, aunque con un rango de valores más acotado.

Estos resultados indican que, aunque ambos fotocatalizadores son capaces de degradar los colorantes Verde Malaquita y Rojo Congo, los materiales basados en grafeno muestran una cinética de degradación superior, especialmente en el caso del colorante Verde Malaquita. Esto puede atribuirse a la afinidad de los colorantes por la superficie del grafeno y sus variantes durante el proceso de tratamiento [53]. Las interacciones entre las regiones ricas en electrones  $\pi$  ( $\pi$ ) del colorante y el grafeno favorecen la adsorción y mejoran los valores de cinética de degradación [51,55]. Estas interacciones, impulsadas por las fuerzas de adsorción y los sistemas de electrones deslocalizados del grafeno, pueden incrementar tanto la velocidad de reacción como la eficiencia de remoción [105]. Por lo tanto, el tipo de fotocatalizador empleado es un factor clave para optimizar la cinética de degradación.

Desde un enfoque estadístico, los resultados de la prueba U de Mann-Whitney (**Figura 18**) revelan que no existen diferencias significativas entre los valores de cinética obtenidos mediante el empleo de los materiales basado en grafeno y el  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizadores en la degradación del Rojo Congo. Esto sugiere que ambos fotocatalizadores ofrecen un desempeño similar para este colorante. Sin embargo, la existencia de diferencias significativas en la degradación del Verde de Malaquita (**Figura 19**) indica que el tipo de fotocatalizador juega un papel más determinante en este caso. Finalmente, la prueba de U de Mann-Whitney aplicada a la comparación entre ambos colorantes (**Figura 21**) muestra que no existen diferencias significativas en las cinéticas de reacción de cada colorante.

Esto sugiere que el tipo de colorante no influye en los valores de cinética de degradación alcanzados mediante la fotocatalisis heterogénea. No obstante, la variabilidad observada en los resultados obtenidos con MBG y TiO<sub>2</sub> podría estar relacionada con otros factores aún no analizados en este estudio.

### **6.3. Factores del tipo de luz que mejoran el porcentaje de remoción**

Los resultados obtenidos respecto al tercer objetivo específico indican que no se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de remoción de los colorantes irradiados bajo diferentes tipos de luz, como se observa en las **Figuras 24 y 25**. Esto sugiere que no existe asociación entre el tipo de colorante y el porcentaje de remoción. Asimismo, se concluye que el uso de cualquiera de las tres fuentes de luz evaluadas no influye significativamente en el porcentaje de remoción de los colorantes. Sin embargo, como muestran las **Figura 22 y 23**, los datos de la luz solar y la luz visible presentan una menor variabilidad en los valores de remoción, con porcentajes concentrados entre el 90% y el 95%. Todo lo anterior sugiere que, al elegir adecuadamente entre la luz solar o la luz visible, es posible alcanzar un rendimiento óptimo de remoción [54].

En el caso del Rojo Congo (**Figura 22**), la luz solar y la luz visible muestran una mayor consistencia en la remoción del colorante, lo que las posiciona como las opciones más adecuadas para su tratamiento. En contraste, para el Verde Malaquita (**Figura 23**), las fuentes de luz más consistentes son la luz solar y la luz UV, mientras que la luz visible presenta una mayor variabilidad en los resultados, lo que reduce su confiabilidad para alcanzar los valores más altos de remoción [99,102,103].

Por esta razón, la luz solar se destaca como la mejor opción debido a su rendimiento estable. Bajo su influencia, los fotocatalizadores generan una cantidad grande de fotones, promoviendo la formación de un mayor número de radicales hidroxilo y superóxido. Estos radicales reaccionan rápidamente con los contaminantes presentes en el agua, logrando una eliminación eficiente [155]. Este efecto fue demostrado en el estudio de Beura y col. [156], donde se

compararon las eficiencias de degradación utilizando materiales de grafeno bajo luz UV y luz solar. Los resultados mostraron que la luz solar permitió alcanzar una mayor eficiencia de degradación (98%).

Además, el uso de la luz solar en el tratamiento fotocatalítico del agua es una alternativa más sostenible [155]. Según Roy y col. [155], los procesos tradicionales de tratamiento de agua requieren una cantidad significativa de energía eléctrica, estimada en aproximadamente 0.6 kWh/m<sup>3</sup>, lo que genera alrededor 185,61 g de CO<sub>2</sub> por KWh consumido [155]. En contraste, el aprovechamiento de la luz solar descarta la necesidad de recurrir a otras fuentes de energía, reduciendo significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se estima que la luz solar proporciona aproximadamente el  $1.5 \times 10^{18}$  kWh/año, suficiente para cubrir las demandas energéticas de plantas de tratamiento fotocatalíticas [155]. Para maximizar el potencial de la energía solar, es fundamental invertir en concentradores solares. Estos dispositivos son clave para optimizar la captación de energía solar y convertirla en energía eléctrica, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de tratamiento [155].

Otro beneficio clave de la irradiación con luz solar en el tratamiento fotocatalítico del agua es la reducción de costos energéticos, ya que la luz solar es una fuente gratuita [155]. Sin embargo, el proceso requiere el uso de concentradores solares, los cuales implican costos iniciales y de mantenimiento. A pesar de ello, dichos costos son recuperables y sostenibles a mediano plazo. En contraste, el uso de fuentes de luz UV conlleva un costo energético de aproximadamente 0.13 dólares/kW.h, sin incluir los gastos asociados al mantenimiento y adquisición de equipos como bombas y lámparas UV [157].

No obstante, el uso de la luz solar también presenta algunas limitaciones. Según Bopape y col. [158], esta fuente de energía solo permite tratar las aguas residuales durante el día y no es viable para la operación nocturna [158]. Este inconveniente fue evidenciado en el estudio realizado por Rani y col. [153], donde se reportó que la remoción de contaminantes bajo exposición a la luz

solar superó el 90%, mientras que en ausencia de luz se redujo a menos del 65% [159].

Esta limitación representa un desafío, ya que las plantas de tratamiento de agua suelen operar de manera continua, incluso durante la noche [158]. Como solución, se propone la implementación de sistemas de almacenamiento de energía, permitiendo así mantener una intensidad lumínica constante y asegurar el funcionamiento nocturno de la planta de tratamiento [158].

Un estudio realizado por Yasmina et al. [159] concluyó que la degradación de contaminantes mediante luz UV requiere necesariamente la combinación con un fotocatalizador, como el  $\text{TiO}_2$ , ya que la irradiación UV por sí sola no es suficientemente efectiva [159]. Esto sugiere que, si bien tanto la luz solar como la luz UV requieren un fotocatalizador para activar el proceso de degradación, la luz solar presenta una ventaja adicional al abarcar un espectro más amplio de longitudes de onda, lo que favorece una mayor generación de especies reactivas y, en consecuencia, una degradación más eficiente de los contaminantes.

## VII. CONCLUSIONES

- Los materiales basados en grafeno demostraron una alta eficiencia como fotocatalizadores en comparación con el  $\text{TiO}_2$ , alcanzando porcentajes de remoción entre el 90% y 100% para la degradación del Rojo Congo y del Verde Malaquita.
- En cuanto a la cinética de degradación, se determinó que la fotocatálisis heterogénea empleando materiales basados en grafeno presenta velocidades de reacción dentro de un rango considerado eficiente ( $0.03 - 0.385 \text{ min}^{-1}$ ), tanto para la degradación del Rojo Congo como para el Verde Malaquita, superando en desempeño al  $\text{TiO}_2$ .
- Se estableció que la fuente de luz más efectiva para maximizar la eficiencia del proceso de fotocatálisis con el empleo de los materiales basados en grafeno para la degradación de ambos colorantes fue la radiación solar.
- Finalmente, se confirmó la relevancia de las variables analizadas en el

proceso de fotocatalisis: el tipo de luz empleada, el porcentaje de remoción y la cinética de degradación. Asimismo, se identificó que el tipo de material utilizado como fotocatalizador es un factor determinante en la eficiencia del proceso.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

Para futuras investigaciones relacionadas con este trabajo, se recomienda, en primer lugar, ampliar el número de artículos y datos recopilados durante la revisión sistemática. Un mayor volumen de información permitirá mejorar las comparaciones y pruebas estadísticas realizadas, al ampliar el alcance de la base de datos y reducir las diferencias entre los rangos y la consistencia de las variables analizadas. Una manera de construir una base de datos más robusta, que permita una interpretación más precisa y generalizable de los resultados sería a través de la eliminación de la barrera del idioma. Para ello, resultaría conveniente traducir aquellos estudios que se encuentren disponibles en otros idiomas, como el chino o árabe, con el fin de maximizar la cantidad y calidad de los datos obtenidos para cada variable.

En segundo lugar, se recomienda continuar los esfuerzos de investigación para identificar y evaluar un conjunto más amplio de variables que puedan influir significativamente en el tratamiento mediante fotocatalisis heterogénea. Además de las variables consideradas en este estudio, pueden incluirse factores adicionales como la dosis de fotocatalizador, el pH de la solución y la concentración inicial del contaminante. La incorporación de estas variables permitirá una comprensión más integral de los factores que afectan el rendimiento del proceso, optimizando su aplicación y demostrando con mayor precisión su eficacia en diferentes condiciones.

Finalmente, para evaluar de manera integral el potencial de los procesos basados en la generación de especies oxidantes avanzadas y el uso de materiales basados en grafeno como fotocatalizadores, se recomienda llevar a cabo pruebas a escala piloto industrial. Este enfoque permitirá validar, en

condiciones reales, las conclusiones obtenidas en este estudio, garantizando su viabilidad y efectividad en el tratamiento de efluentes de la industria textil. Además, contribuirá a reducir la brecha entre la investigación teórica y su aplicación práctica, fortaleciendo la transición hacia tecnologías sostenibles y eficientes.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dudgeon D. Freshwater biodiversity: Status, threats and conservation. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press; 2020. [1]
2. Nasir Z, Sabir A, Salman HM, Ashraf MU, Khalid MF, Khalid MB, et al. Fingerprinting of heavy metal and microbial contamination uncovers the unprecedented scale of water pollution and its implication on human health around transboundary Hudiara drain in South Asia. Environmental Technology & Innovation [Internet]. 2023;30(103040):103040. [Citado 29 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2023.103040>
3. Bochynska S, Duszewska A, Maciejewska-Jeske M, Wrona M, Szeliga A, Budzik M, et al. The impact of water pollution on the health of older people. Maturitas [Internet]. 2024;185(107981):107981. [Citado 29 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.maturitas.2024.107981>
4. Wang Q, Yang Z. Industrial water pollution, water environment treatment, and health risks in China. Environmental Pollution [Internet]. 2016;218:358–65. [Citado 28 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.011>
5. Wang J, Xue B, Wang Y, A Y, Wang G, Han D. Identification of pollution source and prediction of water quality based on deep learning techniques. Journal of Contaminant Hydrology [Internet]. 2024;261(104287):104287. [Citado 8 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104287>
6. Yang J, Li J, Van Vliet MTH, Jones ER, Huang Z, Liu M, et al. Economic risks hidden in local water pollution and global markets: A retrospective analysis (1995-2010) and future perspectives on sustainable development goal 6. Water Research [Internet]. 2024;252(121216):121216. [Citado 29 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2024.121216>
7. Liao L, Du M, Chen Z. Environmental pollution and socioeconomic health

- inequality: Evidence from China. *Sustainable Cities and Society* [Internet]. 2023;95(104579):104579. [Citado 28 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2023.104579>
8. Brañez Sánchez M, Gutiérrez R, Pérez R, Uribe C, Valle P. Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú. Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Campus* [Internet]. 2018;23(26):129–144. [Citado 28 de abril de 2024]. Disponible en: <http://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista26/articulo3.pdf>
  9. Khan AA, Naqvi SR, Ali I, Farooq W, Anjum MW, AlMohamadi H, et al. Algal biochar: A natural solution for the removal of Congo red dye from textile wastewater. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* [Internet]. 2025;166(105312):105312. [Citado el 29 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105312>
  10. Ardila-Leal LD, Poutou-Piñales RA, Pedroza-Rodríguez AM, Quevedo-Hidalgo BE. A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases. *Molecules* [Internet]. 2021;26(13):3813. [citado el 29 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules26133813>
  11. Oladoye PO, Bamigboye MO, Ogunbiyi OD, Akano MT. Toxicity and decontamination strategies of Congo red dye. *Groundwater for Sustainable Development* [Internet]. 2022;19(100844):100844. [Citado 7 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100844>
  12. Gopalakrishnan S, Kannan P, Balasubramani K, Rajamohan N, Rajasimman M. Sustainable remediation of toxic congo red dye pollution using bio based carbon nanocomposite: Modelling and performance evaluation. *Chemosphere* [Internet]. 2023;343:140206. [Citado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140206>

- 13.** Langa C, Tetana ZN, Hintscho-Mbita NC. Effect of calcination temperature on the synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles from *Sutherlandia frutescens* for the degradation of Congo red dye and antibiotics ciprofloxacin and sulfamethoxazole. *Chemical Physics Impact* [Internet]. 2023;7(100389):100389. [Citado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chphi.2023.100389>
- 14.** Hosseini A, Karimi H, Foroughi J, Sabzehmeidani MM, Ghaedi M. Heterogeneous photoelectro-Fenton using ZnO and TiO<sub>2</sub> thin film as photocatalyst for photocatalytic degradation Malachite Green. *Applied Surface Science Advances* [Internet]. 2021;6(100126):100126. [Citado el 4 de septiembre de 2024] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100126>
- 15.** Akram M, Rehman R, Samin G, Al-thagafi ZT, Al-Hazemi ME, Al-Abbad EA. Decontamination of Malachite green and Victoria blue-B dyes by high speed photo-catalyzer reactor using Titania and zinc oxide as catalysts. *Journal of Water Process Engineering* [Internet]. 2023;53(103757):103757. [Citado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103757>
- 16.** Sharma J, Sharma S, Soni V. Toxicity of malachite green on plants and its phytoremediation: A review. *Regional Studies in Marine Science* [Internet]. 2023;62(102911):102911. [Citado 7 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102911>
- 17.** Buscio Olivera V. Tratamiento y reutilización de efluentes de la industria textil mediante técnicas de membranas. Gutiérrez Bouzán MC, Crespi Rosell M, editores. Universitat Politècnica de Catalunya; 2023.
- 18.** Cortazar Martínez A, Coronel Olivares C, Escalante Lozada A, Conzález Ramírez C. Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No 4* [Internet]. 2014;2(3). [Citado el 27 de abril de 2024]. Disponible en:

<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/1862>

- 19.** Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous G, Burton FL, Tsuchihashi R, Stensel HD. Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. 5a ed. Columbus, OH, Estados Unidos de América: McGraw-Hill Education; 2014.
- 20.** González Gutiérrez LV, Escamilla Silva EM. DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE UN COLORANTE AZOICO TIPO REACTIVO [Internet]. Smbb.mx. [Citado el 31 de septiembre de 2024]. Disponible en: [https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA\\_IV/CIV-26.pdf](https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_IV/CIV-26.pdf)
- 21.** Prato MdR, Ávila R, Donquis C, Medina E, Reyes R. Antraquinonas en Aloe Vera Barbadosensis de zonas semiáridas de Falcón, Venezuela, como inhibidores de la corrosión. Multiciencias [Internet]. 2008;8(2):148–154. [Citado 31 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90480203>
- 22.** Kuzu B, Menges N. Indole-containing new types of dyes and their UV-vis and NMR spectra and electronic structures: Experimental and theoretical study. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy [Internet]. 2016;162:61–8. [Citado el 4 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2016.02.046>
- 23.** Porkodi M, Brahmane MP, Pathan MA, Poojary N, Singh S, Harshavarthini M, et al. Indigo dyes: Toxicity, teratogenicity, and genotoxicity studies in zebrafish embryos. Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis [Internet]. 2024;896(503752):503752. [Citado el 4 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503752>
- 24.** Germinario G, Rigante ECL, Van der Werf ID, Sabbatini L. Pyrolysis gas chromatography–mass spectrometry of triarylmethane dyes. Journal of

- Analytical and Applied Pyrolysis [Internet]. 2017;127:229–39. [Citado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iaap.2017.08.001>
- 25.** Das S, Cherwoo L, Singh R. Decoding dye degradation: Microbial remediation of textile industry effluents. *Biotechnology Notes* [Internet]. 2023;4:64–76. [Citado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotno.2023.10.001>
- 26.** Sakti SCW, Laily RN, Aliyah S, Indrasari N, Fahmi MZ, Lee HV, et al. Re-collectable and recyclable epichlorohydrin-crosslinked humic acid with spinel cobalt ferrite core for simple magnetic removal of cationic triarylmethane dyes in polluted water. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [Internet]. 2020;8(4):104004. [Citado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104004>
- 27.** Oliveira JMS, De Lima E Silva MR, Issa CG, Corbi JJ, Damianovic MHRZ, Foresti E. Intermittent aeration strategy for azo dye biodegradation: A suitable alternative to conventional biological treatments? *Journal of Hazardous Materials* [Internet]. 2020;385(121558):121558. [Citado 31 de agosto de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121558>
- 28.** GilPavas E, Universidad Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (EAFIT), Arbeláez-Castaño PE, Medina-Arroyave JD, Gómez-Atehortua CM, Universidad Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (EAFIT), et al. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE COAGULACIÓN QUÍMICA ACOPLADA A PROCESOS FENTON INTENSIFICADOS CON ULTRASONIDO DE BAJA FRECUENCIA. *Rev Int Contam Ambient* [Internet]. 2018;34(1):157–67. [Citado 27 de abril de 2024]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v34n1/0188-4999-rica-34-01-157.pdf>
- 29.** Patel H, Vashi RT. Characterization of Textile Wastewater. En: *Characterization and Treatment of Textile Wastewater*. Elsevier; 2015. p. 21–71. [Citado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802326-6.00002-2>

- 30.** Us EPA OW. National Primary Drinking Water Regulations. 2015 [Citado el 3 de setiembre de 2024]; Disponible en: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
- 31.** Gobierno del Perú. D.S. N° 021-2009-VIVIENDA OAS [Internet] 2000 [Citado el 3 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4229707/Decreto%20Supremo%20021-2009.pdf.pdf?v=1678291432>
- 32.** López Ramírez MA, Castellanos Onorio OP, Lango Reynoso F, Castañeda Chávez MdR, Montoya Mendoza J, Sosa Villalobos CA, et al. Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. Enfoque UTE [Internet]. 2021 [Citado el 27 de abril de 2024];12(4):76–87. Disponible en: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-65422021000400076](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422021000400076)
- 33.** Rubio-Clemente A, Chica EL, Peñuela GA. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater [Internet]. Org.co. [Citado el 27 de abril de 2024]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v16n2/v16n2a19.pdf>
- 34.** Rodríguez Peña M, Barrera Díaz CE. Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua. Primera edición. Toluca, México. Comps; 2020.
- 35.** Domènech X, Jardim WF, Litter MI. Capítulo 1: Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. 7-32
- 36.** Forero J-E, Ortiz O-P, Ríos F. APLICACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA COMO TRATAMIENTO DE FENOL EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE REFINERÍA. C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro [Internet]. 2005 [Citado 27 de abril de 2024]; 3(1),97-109. Disponible en:

<http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v3n1/v3n1a08.pdf>

- 37.** Panhwar A, Jatoi AS, Mazari SA, Kandhro A, Rashid U, Qaisar S. Water resources contamination and health hazards by textile industry effluent and glance at treatment techniques: A review. Waste Management Bulletin. [Internet] 2024 [Citado 27 de abril de 2024]; 1(4),158-163. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949750723000305#s0010>
- 38.** Ibarra-Taquez HN, Dobrosz-Gómez I, Gómez M-Á. Optimización Multiobjetivo del Proceso Fenton en el Tratamiento de Aguas Residuales provenientes de la Producción de Café Soluble. CIT Información Tecnológica [Internet]. 2018 [Citado el 31 de agosto de 2024]; 29(5):111–22. Disponible en: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000500111&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000500111&script=sci_arttext)
- 39.** García Herrera JC. PROCESOS FENTON Y FOTO-FENTON PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LABORATORIO MICROBIOLÓGICO EMPLEANDO Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SOPORTADO EN NANOTUBOS DE CARBONO. PUJ [Internet] 2014 [Citado el 1 de septiembre de 2024] Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11853/GarciaHerreraJulianCamilo2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 40.** Ortega-Liébana MC, Sánchez-López E, Hidalgo-Carrillo J, Marinas A, Marinas JM, Urbano FJ. A comparative study of photocatalytic degradation of 3-chloropyridine under UV and solar light by homogeneous (photo-Fenton) and heterogeneous (TiO<sub>2</sub>) photocatalysis. Applied Catalysis B: Environmental [Internet]. 2012;127:316–22. [Citado 28 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.08.036>
- 41.** López-Vásquez AF, Franco-Macias JM, Montes-Alba EJ. Fotocatálisis/Adsorción para la Eliminación de Carbono Orgánico Total presente en Vapor Condensado de Cocci6n generado en el Tratamiento de Subproductos Avícolas. 2017;28:209–18. [Citado 28 de abril de 2024].

Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v28n1/art21.pdf>

- 42.** Arroyave Rojas JA; Garcés Giraldo LF. Evaluación de la degradación del pesticida Mertect empleando procesos avanzados de oxidación (PAO). Rev. P+L. [Internet]. 2011; 6(2),9-18. [Citado 28 de abril de 2024]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v6n2/v6n2a02.pdf>
- 43.** Rodríguez-Alfaro LF, Luévano Hipólito E, Torres-Martínez LM. Nanopartículas de TiO<sub>2</sub> fotocatalíticas incorporadas en materiales de construcción. ¡Construyamos edificios inteligentes! Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología [Internet]. 2023;17(32):1e–39e. [Citado el 1 de septiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69737>
- 44.** Ramalingam G, Perumal N, Priya AK, Rajendran S. A review of graphene-based semiconductors for photocatalytic degradation of pollutants in wastewater. Chemosphere [Internet]. 2022;300(134391):134391. [Citado 7 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134391>
- 45.** Aleksandra B. Djurišić, Yanling He, Alan M. C. Ng; Visible-light photocatalysts: Prospects and challenges. APL Mater. 1 March 2020; 8 (3): 030903. [Citado 29 de julio de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/1.5140497>
- 46.** Gómez-Garzón, M. Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. Repertorio de Medicina y Cirugía. [Internet] 16 de julio de 2018; 27 (2). [Citado el 1 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://revistas.fucsalud.edu.co/index.php/repertorio/article/view/191>
- 47.** Fernando SPC, Elizabeth MAG. ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE COLORANTES AZOICOS CON EL USO DE DIÓXIDO DE TITANIO (TiO<sub>2</sub>) Y ÓXIDO DE ZINC (ZnO) INMOVILIZADOS EN SOPORTES POLIMÉRICOS [Internet]. 2016. [Citado el 30 de julio de 2025]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10067.27689>

- 48.** Estrada-Flores SL. Nanomateriales: conceptos, aplicación en nanoterapia y regulaciones [Internet]. Uba.ar. [citado el 30 de julio de 2025]. Disponible en: <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v22n1/E0242.pdf>
- 49.** Liao L, Wang M, Li Z, Wang X, Zhou W. Recent advances in black TiO<sub>2</sub> nanomaterials for solar energy conversion. *Nanomaterials (Basel)* [Internet]. 2023;13(3):468. [citado el 29 de julio de 2025]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/nano13030468>
- 50.** Chowdhury S, Balasubramanian R. Graphene/semiconductor nanocomposites (GSNs) for heterogeneous photocatalytic decolorization of wastewaters contaminated with synthetic dyes: A review. *Applied Catalysis B: Environmental* [Internet]. 2014;160–161:307–24. [Citado 7 de abril de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.05.035>
- 51.** Khan ME, Khan MM, Cho MH. Recent progress of metal–graphene nanostructures in photocatalysis. *Nanoscale* [Internet] 2018 10(20):9427–40. [Citado 7 de abril de 2024]. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/nr/c8nr03500h>
- 52.** Maduraiveeran G, Jin W. Carbon nanomaterials: Synthesis, properties and applications in electrochemical sensors and energy conversion systems. *Materials Science and Engineering: B* [Internet]. 2021;272(115341):115341. [Citado 29 de julio de 2025]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115341>
- 53.** Dubey AK, Yadav RK, Gole VL, Sharma K, Singh S, Shahin R, et al. Functionalized nitrogen-enriched graphene as a highly efficient photocatalyst for oxidative cyclization of thioamide and degradation of Dye. *Journal of Molecular Structure* [Internet]. 2024;1312(138557):138557. [Citado 15 de junio de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138557>
- 54.** Chitkara M, Goyal N, Kumar A, Marasamy L, Haq S, Aldossari SA, et al.

Tailoring graphene-oxide and reduced-graphene-oxide with NaNO<sub>3</sub> and CaCl<sub>2</sub> catalysts with enhanced photo-catalytic degradation of methylene blue dye. RSC Adv [Internet]. 2024;14(13):8769–78. [Citado 15 de junio de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra08256c>

- 55.** Wani AA, Rather RA, Shaari N, Khan U, Muhammad T, Hussain SM, et al. Aspects of superior photocatalytic dye degradation and adsorption efficiency of reduced graphene oxide multiwalled carbon nanotubes with modified ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites. Journal of Environmental Chemical Engineering [Internet]. 2024;12(2):112461. [Citado 15 de junio de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2024.112461>
- 56.** Wang B, Li M, Li C, Xuan X, Li H. Boron-doped diamond/graphene/Ti mesh array-based anode and boron-doped graphene/Ti mesh array-based cathode for the rapid degradation of organic dyes. Journal of Environmental Chemical Engineering [Internet]. 2024;12(4):113254. [Citado 15 de junio de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2024.113254>
- 57.** Clayden J., Greeves, N. & Warren, S. ORGANIC CHEMISTRY. Oxford; 2012.
- 58.** Barrios-Ziolo LF, Gaviria-Restrepo LF, Agudelo EA. Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. Dyna (Medellin) [Internet]. 2015;82(191):118–26. [Citado 12 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49639089015>
- 59.** Manrique Losada L, Laguna Castillo EJ, Osorio Restrepo EA, Serna Galvis EA, Torres Palma RA. Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocátalisis con TiO<sub>2</sub> usando luz artificial y solar. Prod Limpia [Internet]. 2017;12(2):50–60. [Citado 12 de mayo de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22507/pml.v12n2a4>
- 60.** Agudelo Valencia RN, Ovalle González DP, Rodríguez Rodríguez LF. Aplicación de foto fenton (VIS) para la remoción de sulfuros y DQO en aguas

residuales de curtiembre. Luna Azul [Internet]. 2020;50(50):215–28. [Citado el 12 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/4197>

- 61.** Gil Pavas E, Quintero Olaya L, Rincón Uribe M, Rivera Agudelo D. DEGRADACIÓN DE COLORANTES DE AGUAS RESIDUALES EMPLEANDO UV/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>. Universidad Eafit [Internet] (2007). Vol. 43, número 146, 80-101. [Citado 12 de mayo de 2024]. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/>
- 62.** Estrada-Martínez A, Ortega-Ruiz J, Urango Cardenas ID, Enamorado-Montes G, Marrugo-Negrete J. Fotocatálisis heterogénea para el tratamiento de aguas residuales generadas en el baño del ganado. Rev Investig Agrar Ambient [Internet]. 2019 ;10(2):115–26. [Citado el 12 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2683>
- 63.** Scopus [Internet]. Países Bajos: CWTS, 2004-[Citado el 8 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=heterogeneous+photocatalysis+with+graphene&sid=d5b77168d9941e387526ac1213f837a1&sot=b&sdt=b&sl=57&s=TITLE-ABS-KEY%28heterogeneous+photocatalysis+with+graphene%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present&sessionSearchId=d5b77168d9941e387526ac1213f837a1&limit=10>
- 64.** PRISMA 2020 checklist [Internet]. PRISMA statement. [citado el 28 de julio de 2025]. Disponible en: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-checklist>
- 65.** Nascimento Júnior WJ do, de Aguiar GH, Landers R, Vieira MGA, Motta Sobrinho MA da. Potential of the main magnetic iron oxides synthesized over graphene oxide in integrated adsorption and photocatalysis of inorganic and organic emergent contaminants. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects [Internet].

2023;671(131647):131647. [Citado el 23 de setiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131647>

- 66.** Ahmadpour N, Nowrouzi M, Madadi Avargani V, Sayadi MH, Zendejboudi S. Design and optimization of TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts for efficient removal of pharmaceutical pollutants in water: Recent developments and challenges. *Journal of Water Process Engineering* [Internet]. 2024;57(104597):104597. [Citado el 23 de setiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104597>
- 67.** Esfandian H, Mirzaei S, Chari AS, Ghadi RA, Moqadam IH. Photocatalytic degradation of chlorpyrifos pesticide in aqueous solution using Cu-doped TiO<sub>2</sub>/GO photocatalysis vicinity of UV and visible light. *Materials Science and Engineering: B* [Internet]. 2024;305(117385):117385. [Citado el 25 de setiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117385>
- 68.** Maldonado Pérez AX, Pérez Bueno J de J. Photocatalysis of silicon nanowires decorated with metallic nanoparticles and graphene oxide under different light intensities. *Journal of Materials Research and Technology* [Internet]. 2024;28:390–410. [Citado el 23 de setiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.273>
- 69.** Nuengmatcha P, Kuyyogsuy A, Porrawatkul P, Pimsen R, Chanthai S, Nuengmatcha P. Efficient degradation of dye pollutants in wastewater via photocatalysis using a magnetic zinc oxide/graphene/iron oxide-based catalyst. *Water Science and Engineering* [Internet]. 2023; 16(3): 243-251. [Citado el 23 de setiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2023.01.004>
- 70.** Youssef Z, Colombeau L, Yesmurzayeva N, Baros F, Vanderesse R, Hamieh T, et al. Dye-sensitized nanoparticles for heterogeneous photocatalysis: Cases studies with TiO<sub>2</sub>, ZnO, fullerene and graphene for water purification. *Dyes and Pigments* [Internet]. 2018;159:49–71. [Citado el 25 de setiembre de

2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.06.002>

- 71.** Wu HW, Emadi A, de Graaf G, Leijtens J, Wolffenbuttel RF. Design and fabrication of an albedo insensitive analog sun sensor. *Procedia Engineering* [Internet]. 2011;25:527–30. [Citado el 23 de setiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.131>
- 72.** Mary A S, Norbert A, Shaji S, Philip RR. Electrochemically anodized solid and stable ZnO nanorods as an adsorbent/ nanophotocatalyst: ROS mediated degradation of azo dyes congo red and methyl orange. *Journal of Cleaner Production* [Internet]. 2023;428(139466):139466. [Citado el 23 de setiembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139466>
- 73.** Ali MHH, Goher ME, Al-Afify ADG, El-Sayed SM. A facile method for synthesis rGO/Ag nanocomposite and its uses for enhancing photocatalytic degradation of Congo red dye. *SN Appl Sci* [Internet]. 2022;4(10). [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s42452-022-05163-0>
- 74.** Alamelu K, Raja V, Shiamala L, Jaffar Ali BM. Biphasic TiO<sub>2</sub> nanoparticles decorated graphene nanosheets for visible light driven photocatalytic degradation of organic dyes. *Applied Surface Science* [Internet]. 2018;430:145–54. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.054>
- 75.** Jo W-K, Kumar S, Isaacs MA, Lee AF, Karthikeyan S. Cobalt promoted TiO<sub>2</sub>/GO for the photocatalytic degradation of oxytetracycline and Congo Red. *Applied Catalysis B: Environmental* [Internet]. 2017;201:159–68. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.022>
- 76.** Fatima S, Ali SI, Iqbal MZ, Rizwan S. Congo red dye degradation by graphene nanoplatelets/doped Bismuth Ferrite nanoparticle hybrid catalysts under

- dark and light conditions. *Catalysts* [Internet]. 2020;10(4):367. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/catal10040367>
- 77.** Shaalan NM, Rashad M, Awada C. Synergistic effect of NiO-Ga<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-graphene heterostructures on Congo red photodegradation in water. *Separations* [Internet]. 2022;9(8):201. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/separations9080201>
- 78.** Kaushik J, Himanshi, Kumar V, Tripathi KM, Sonkar SK. Sunlight-promoted photodegradation of Congo red by cadmium-sulfide decorated graphene aerogel. *Chemosphere* [Internet]. 2022;287(Pt 3):132225. [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132225>
- 79.** El-Khawaga AM, Tantawy H, Elsayed MA, Abd El-Mageed AIA. Synthesis and applicability of reduced graphene oxide/porphyrin nanocomposite as photocatalyst for waste water treatment and medical applications. *Sci Rep* [Internet]. 2022;12(1):17075. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-21360-8>
- 80.** Mitra M, Ahamed ST, Ghosh A, Mondal A, Kargupta K, Ganguly S, et al. Polyaniline/reduced graphene oxide composite-enhanced visible-light-driven photocatalytic activity for the degradation of organic dyes. *ACS Omega* [Internet]. 2019;4(1):1623–35. [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.8b02941>
- 81.** Punnakkal VS, Anila EI. Polypyrrole/ silver/graphene ternary nanocomposite synthesis and study on photocatalytic property in degrading Congo red dye under visible light. *Surfaces and Interfaces* [Internet]. 2023;42(103342):103342. [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103342>
- 82.** Jiang R, Zhu H, Fu Y, Jiang S, Zong E, Yao J. Photocatalytic decolorization of

Congo red wastewater by magnetic ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/graphene nanosheets composite under simulated solar light irradiation. *Ozone: Sci Eng* [Internet]. 2020;42(2):174–82. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/01919512.2019.1635432>

- 83.** Rahnama F, Ashrafi H, Akhond M, Absalan G. Introducing Ag<sub>2</sub>O-Ag<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/rGO nanoadsorbents for enhancing photocatalytic degradation rate and efficiency of Congo red through surface adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [Internet]. 2021;613(126068):126068. [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126068>
- 84.** Ong CB, Mohammad AW, Ng LY. Integrated adsorption-solar photocatalytic membrane reactor for degradation of hazardous Congo red using Fe-doped ZnO and Fe-doped ZnO/rGO nanocomposites. *Environmental Science and Pollution Research* [Internet]. 2019;26(33):33856–69. [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-2557-2>
- 85.** Wu Z, Yuan X, Zhong H, Wang H, Jiang L, Zeng G, et al. Highly efficient adsorption of Congo red in single and binary water with cationic dyes by reduced graphene oxide decorated NH<sub>2</sub>-MIL-68(Al). *Journal of Molecular Liquids* [Internet]. 2017;247:215–29. [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2017.09.112>
- 86.** Eltaweil AS, Elshishini HM, Ghatass ZF, Elsubruiti GM. Ultra-high adsorption capacity and selective removal of Congo red over aminated graphene oxide modified Mn-doped UiO-66 MOF. *Powder Technology* [Internet]. 2021;379:407–16. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.084>
- 87.** Pang YL, Tee SF, Lim S, Abdullah AZ, Ong HC, Wu C-H, et al. Enhancement of photocatalytic degradation of organic dyes using ZnO decorated on reduced graphene oxide (rGO). *Desalination and Water Treatment*

[Internet]. 2018;108:311–21. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2018.21947>

- 88.** Rashad M, Helali S, Shaalan NM, Albalawi AE, Alatawi NS, Al-Faqiri B, et al. Dual studies of photo degradation and adsorptions of Congo red in wastewater on graphene-copper oxide heterostructures. *Materials (Basel)* [Internet]. 2023;16(10):3721. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/ma16103721>
- 89.** Asaad Mahdi M, Farhan MA, Mahmoud ZH, Mahdi Rheima A, sabri Abbas Z, Kadhim MM, et al. Direct sunlight photodegradation of congo red in aqueous solution by TiO<sub>2</sub>/rGO binary system: Experimental and DFT study. *Arabian Journal of Chemistry* [Internet]. 2023;16(8):104992. [Citado el 9 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabic.2023.104992>
- 90.** Jiang H, Cao Y, Zeng F, Xie Z, He F. A novel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene oxide composite prepared by click chemistry for high-efficiency removal of Congo red from water. *Journal of Nanomaterials* [Internet]. 2021;2021:1–11. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2021/9716897>
- 91.** Govinda V, Reddy S, Prasad C, Sambasivam S, Bahadur I, Katata-Seru LM, et al. Congo red dye reduction mediated by the electron (e<sup>-</sup>) transfer route of BH<sub>4</sub><sup>-</sup> ions using synthesized NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO hybrid nanosheets. *Mater Res Express* [Internet]. 2024; 11(6):065003. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ad4e9f#references>
- 92.** Chate VR, Desai VGM, Dodagoudar GR, Guimarães JR, Kulkarni RM. Development of a novel photocatalyst: Titania nanostructure bunches decorated on graphene oxide for enhanced photocatalytic efficiency. *Materials Research Bulletin* [Internet]. 2022;146(111601):111601. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111601>

- 93.** Ahasan T, Xu P, Wang H. Dual-function photocatalysis in the visible spectrum: Ag-G-TiO<sub>2</sub> for simultaneous dye wastewater degradation and hydrogen production. *Catalysts* [Internet]. 2024;14(8):530. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/catal14080530>
- 94.** Ahmad I, Shukrullah S, Ahmad M, Ahmed E, Naz MY, Akhtar MS, et al. Effect of Al doping on the photocatalytic activity of ZnO nanoparticles decorated on CNTs and graphene: Solvothermal synthesis and study of experimental parameters. *Materials Science in Semiconductor Processing* [Internet]. 2021;123(105584):105584. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105584>
- 95.** Li W, Tong J, Li G. Graphene oxide intercalated Alk-MXene adsorbents for efficient removal of Malachite green and Congo red from aqueous solutions. *Chemosphere* [Internet]. 2024;360(142376):142376. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142376>
- 96.** Ye B, Zhao Z, Liu H. Photocatalytic degradation of Estrone and Congo red by the magnetic antibacterial photocatalyst g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/M-rGO under visible light and optimization by Box-Behnken statistical design (BBD). *Journal of Molecular Structure* [Internet]. 2023;1272(134205):134205. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134205>
- 97.** Shekardasht MB, Givianrad MH, Gharbani P, Mirjafary Z, Mehrizad A. Preparation of a novel Z-scheme g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/RGO/Bi<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>9</sub> nanophotocatalyst for degradation of Congo Red dye under visible light. *Diamond and Related Materials* [Internet]. 2020;109(108008):108008. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108008>
- 98.** Khan F, Khan MS, Kamal S, Arshad M, Ahmad SI, Nami SAA. Recent advances in graphene oxide and reduced graphene oxide based nanocomposites for

the photodegradation of dyes. *J Mater Chem C Mater Opt Electron Devices* [Internet]. 2020;8(45):15940–55. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1039/d0tc03684f>

- 99.** Sriramraj M, Balu AR, Chitra Devi S, Sowmiya Devi B, Suganya M, Devendran K, et al. Reduced graphene oxide–MgTiO<sub>3</sub> hybrid nanomaterial for energy storage, degradation of congo red dye and antimicrobial agent against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* bacterial strains. *Inorganic Chemistry Communications* [Internet]. 2023;(111734):111734. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111734>
- 100.** Mandal P, Debbarma J, Saha M. Critical review on the photodegradation ability of graphene and its derivatives against malachite green, methylene blue, and methyl orange. *Letters in Applied NanoBioScience* [Internet]. 2022;12(1):6. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.33263/lianbs121.006>
- 101.** Wang Q, Cai C, Wang M, Guo Q, Wang B, Luo W, et al. Efficient photocatalytic degradation of malachite green in seawater by the hybrid of zinc-oxide nanorods grown on three-dimensional (3D) reduced graphene oxide(RGO)/Ni foam. *Materials (Basel)* [Internet]. 2018;11(6). [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/ma11061004>
- 102.** Du F, Sun L, Huang Z, Chen Z, Xu Z, Ruan G, et al. Electrospun reduced graphene oxide/TiO<sub>2</sub>/poly(acrylonitrile-co-maleic acid) composite nanofibers for efficient adsorption and photocatalytic removal of malachite green and leucomalachite green. *Chemosphere* [Internet]. 2020;239(124764):124764. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124764>
- 103.** Giang NTH, Hai ND, Thinh NT, Tan NN, Phuong LP, Thinh DB, et al. Enhanced photocatalytic degradation of malachite green by sulfur-doped

titanium dioxide/porous reduced graphene oxide. *Diamond and Related Materials* [Internet]. 2022;129(109321):109321. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109321>

- 104.** Rout DR, Chaurasia S, Jena HM. Enhanced photocatalytic degradation of malachite green using manganese oxide doped graphene oxide/zinc oxide (GO-ZnO/Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ternary composite under sunlight irradiation. *Journal of Environmental Management* [Internet]. 2022;318(115449):115449. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115449>
- 105.** Al Kausor M, Chakraborty D. Graphene oxide based semiconductor photocatalysts for degradation of organic dye in waste water: A review on fabrication, performance enhancement and challenges. *Inorganic Chemistry Communications* [Internet]. 2021;129(108630):108630. [Citado el 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108630>
- 106.** El-Hout SI, El-Sheikh SM, Gaber A, Shawky A, Ahmed AI. Highly efficient sunlight-driven photocatalytic degradation of malachite green dye over reduced graphene oxide-supported CuS nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds* [Internet]. 2020;849(156573):156573. [Citado el 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156573>
- 107.** Chandel N, Sharma K, Sudhaik A, Raizada P, Hosseini-Bandegharai A, Thakur VK, et al. Magnetically separable ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and ZnO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> photocatalysts supported onto nitrogen doped graphene for photocatalytic degradation of toxic dyes. *Arabian Journal of Chemistry* [Internet]. 2020;13(2):4324–40. [Citado el 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2019.08.005>
- 108.** He, Z., Zhang, M., Yu, H., Li, Z., Deng, B., & Ren, H. (2024). Multifunctional BiPO<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>/rGO composite for enhancement removal of

malachite green and levofloxacin via adsorption and visible-light photocatalysis synergy. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 169(107891), 107891. [Citado el 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107891>

- 109.** Bibi S, Ahmad A, Anjum MAR, Haleem A, Siddiq M, Shah SS, et al. Photocatalytic degradation of malachite green and methylene blue over reduced graphene oxide (rGO) based metal oxides (rGO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>) nanocomposite under UV-visible light irradiation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [Internet]. 2021;9(4):105580. [Citado el 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.105580>
- 110.** Abdelmaksoud M, Mohamed A, Sayed A, Khairy S. Physical properties of PVDF-GO/black-TiO<sub>2</sub> nanofibers and its photocatalytic degradation of methylene blue and malachite green dyes. *Environ Sci Pollut Res Int* [Internet]. 2021;28(24):30613–25. [Citado el 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-12618-1>
- 111.** Abutalib, M. M., Alghamdi, H. M., Rajeh, A., Nur, O., Hezmad, A. M., & Mannaa, M. A. (2022). Preparation of rGO/FeMoO<sub>4</sub> as high-performance photocatalyst for degradation of malachite green, phenol and H<sub>2</sub> evolution under natural sunlight. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 32955–32968. [Citado el 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.189>
- 112.** Rout DR, Jena HM. Removal of malachite green dye from aqueous solution using reduced graphene oxide as an adsorbent. *Mater Today* [Internet]. 2021;47:1173–82. [Citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.406>
- 113.** Kallawar GA, Bhanvase BA, Sathe BR. Sonochemically prepared bismuth doped titanium oxide-reduced graphene oxide (Bi@TiO<sub>2</sub>-rGO) nanocomposites for effective visible light photocatalytic degradation of malachite green. *Diamond and Related Materials* [Internet].

2023;139(110423):110423. [Citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110423>

- 114.** Yadav P, Surolia PK, Vaya D. Synthesis and application of copper ferrite-graphene oxide nanocomposite photocatalyst for the degradation of malachite green. *Mater Today* [Internet]. 2021;43:2949–53. [Citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.301>
- 115.** Alanazi MM, Abdelmohsen SAM, Alahmari SD, Khan SA, Henaish AMA, Dahshan A, et al. Synthesis of magnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO heterostructure as potential photocatalyst for a breakdown of malachite green (MG) dye under the visible source of light. *Diamond and Related Materials* [Internet]. 2024;145(111128):111128. [Citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111128>
- 116.** Lu J, Zhou Y, Lei J, Ao Z, Zhou Y. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene aerogels: A stable and efficient persulfate activator for the rapid degradation of malachite green. *Chemosphere* [Internet]. 2020;251(126402):126402. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126402>
- 117.** Abdullah MM, Albargi HB, Alahmari SD, Algethami JS, Henaish AMA, Ahmad Z, et al. Visible-light-driven 2D carbonaceous-based SnSe nanohybrid soft materials: A photocatalyst for efficient photo reduction of malachite green dye. *Journal of Molecular Liquids* [Internet]. 2024;401(124668):124668. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124668>
- 118.** Medidi S, Markapurapu S, Kotupalli MR, Chinnam RKR, Susarla VM, Gandham HB, et al. Visible light photocatalytic degradation of methylene blue and malachite green dyes with CuWO<sub>4</sub>-GO nano composite. *Mod Res Catal* [Internet]. 2018;07(02):17–34. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4236/mrc.2018.72002>

- 119.** Zhao Z, Cai Z, Yang L, Hu Z, Zhang Y, Peng X, et al. Ternary magnetic Ag–Cu/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO composite as an efficient photocatalyst for degradation of malachite green. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2018;29(20):17743–9. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-018-9881-7>
- 120.** Arshad A, Nisar TQ, Zulqurnain M, Niazi RK, Mansoor Q. SnO<sub>2</sub>nanorods/graphene nanoplatelets nanocomposites: towards fast removal of malachite green and pathogen control. *Nanotechnology* [Internet]. 2021;33(11):115101. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/abfdef>
- 121.** Ahmed MK, Shalan AE, Afifi M, El-Desoky MM, Lanceros-Méndez S. Retraction to “silver-doped cadmium selenide/graphene oxide-filled cellulose acetate nanocomposites for photocatalytic degradation of malachite green toward wastewater treatment”. *ACS Omega* [Internet]. 2023;8(35):32221. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.3c05698>
- 122.** Gul K, Khan H, Muhammad N, Ara B, Zia TUH. Removal of toxic malachite green dye from aqueous environment using reduced magnetic graphene oxide as an efficient and reusable adsorbent. *Sep Sci Technol* [Internet]. 2021;56(15):2507–20. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/01496395.2020.1839498>
- 123.** Lv D, Zhang J, Luo Z, Dai Z, Tang B. Removal of malachite green in wastewater and its mechanism by three-dimensional graphene oxide-based aerogels. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [Internet]. 2025;144:380–94. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2024.09.032>
- 124.** Naeem H, Tofil HM, Soliman M, Hai A, Zaidi SHH, Kizilbash N, et al. Reduced graphene oxide-zinc sulfide nanocomposite decorated with silver nanoparticles for wastewater treatment by adsorption, photocatalysis

and antimicrobial action. *Molecules* [Internet]. 2023;28(3):926. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules28030926>

**125.** Harun N, Rahman M, Kamarudin W, Irwan Z, Muhammad A, Akhir NEF, et al. Photocatalytic degradation of Congo red dye based on titanium dioxide using solar and UV lamp. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* [Internet]. 2018;10(1S):832–46. [Citado el 13 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.ajol.info/index.php/jfas/article/view/168470>

**126.** Landge VK, Huang C-M, Hakke VS, Sonawane SH, Manickam S, Hsieh M-C. Solar-energy-driven Cu-ZnO/TiO<sub>2</sub> nanocomposite photocatalyst for the rapid degradation of Congo red azo dye. *Catalysts* [Internet]. 2022;12(6):605. [Citado el 31 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/catal12060605>

**127.** Hammud HH, Traboulsi H, Karnati RK, Bakir EM. Photodegradation of Congo red by modified P25-titanium dioxide with cobalt-carbon supported on SiO<sub>2</sub> matrix, DFT studies of chemical reactivity. *Catalysts* [Internet]. 2022;12(3):248. [Citado el 31 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/catal12030248>

**128.** Turcu E, Coromelci CG, Harabagiu V, Ignat M. Enhancing the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> for the degradation of Congo Red dye by adjusting the ultrasonication regime applied in its synthesis procedure. *Catalysts* [Internet]. 2023;13(2):345. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/catal13020345>

**129.** Bibi S, Shah SS, Muhammad F, Siddiq M, Kiran L, Aldossari SA, et al. Cu-doped mesoporous TiO<sub>2</sub> photocatalyst for efficient degradation of organic dye via visible light photocatalysis. *Chemosphere* [Internet]. 2023;339(139583):139583. [Citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139583>

- 130.** Nurdin M, Maulidiyah M, Syahputra RA, Salim LOA, Wati I, Irwan I, et al. Degradation test of organic congo red compounds using Mn-TiO<sub>2</sub>/Ti electrode by photocatalytic under the uv-visible irradiation. J Phys Conf Ser [Internet]. 2021;1899(1):012047. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012047>
- 131.** Chai YD, Pang YL, Lim S, Chong WC. Sonocatalytic degradation of Congo Red using biomass-based cellulose/TiO<sub>2</sub> composite. MaterialsToday: Proceedings [Internet]. 2020; (1), 50-55. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.246>
- 132.** Al-Mamun MR, Kader S, Islam MS, Khan MZH. Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO<sub>2</sub> photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering [Internet]. 2019;7(5):103248. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2019.103248>
- 133.** Amigun AT, Adekola FA, Tijani JO, Mustapha S. Photocatalytic degradation of malachite green dye using nitrogen/sodium/iron-TiO<sub>2</sub> nanocatalysts. Results in Chemistry [Internet]. 2022;4(100480):100480. [Citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100480>
- 134.** Majnis MF, Yee OC, Mohd Adnan MA, Yusof Hamid MR, Ku Shaari KZ, Muhd Julkapli N. Photoactive of Chitosan-ZrO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> thin film in catalytic degradation of malachite green dyes by solar light. Optical Materials (Amst) [Internet]. 2022;124(111967):111967. [Citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2022.111967>
- 135.** Imessaoudene A, Mechraoui O, Aberkane B, Benabbas A, Manseri A, Moussaoui Y, et al. Synthesis of a TiO<sub>2</sub>/zeolite composite: Evaluation of adsorption-photodegradation synergy for the removal of

Malachite Green. Nano-Structures & Nano-Objects [Internet]. 2024;38(101191):101191. [Citado el 18 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101191>

**136.** Liu J, Liu Z, Piao C, Li S, Tang J, Fang D, et al. Construction of fixed Z-scheme Ag|AgBr/Ag/TiO<sub>2</sub> photocatalyst composite film for malachite green degradation with simultaneous hydrogen production. Journal of Power Sources [Internet]. 2020;469(228430):228430. [Citado el 18 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228430>

**137.** Channei D, Thammaacheep P, Jannoey P. Utilizing banana peel in conjunction with TiO<sub>2</sub> photocatalyst for the efficient decolorization of malachite green. Chemical Physics Impact [Internet]. 2024;8(100629):100629. [Citado el 18 de octubre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100629>

**138.** Amiri-Hosseini S, Hashempour Y. Photocatalytic removal of Malachite green dye from aqueous solutions by nano-composites containing titanium dioxide: A systematic review. Environmental Health Engineering and Management Journal [Internet]. 2021;8(4):295–302. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.34172/ehem.2021.33>

**139.** Ma Y, Ni M, Li S. Optimization of malachite green removal from water by TiO<sub>2</sub> nanoparticles under UV irradiation. Nanomaterials (Basel) [Internet]. 2018;8(6). [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/nano8060428>

**140.** Kamble RJ, Gaikwad PV, Garadkar KM, Sabale SR, Puri VR, Mahajan SS. Photocatalytic degradation of malachite green using hydrothermally synthesized cobalt-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. J Iran Chem Soc [Internet]. 2022;19(1):303–12. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s13738-021-02303-y>

- 141.** Escobar-Alarcón L, Solís-Casados DA. Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO<sub>2</sub> en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología [Internet]. 2020;14(26):1e–23e. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-56912021000100001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912021000100001)
- 142.** Mancilla J, Medalla C, Bernal J. AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE SENSORES NANOESTRUCTURADOS PARA APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES: UNA REVISIÓN EXHAUSTIVA [Internet]. Interciencia.net. [Citado el 4 de diciembre de 2024]. Disponible en: [https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2024/10/01\\_7202\\_A\\_Bernal\\_v49n9\\_5.pdf](https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2024/10/01_7202_A_Bernal_v49n9_5.pdf)
- 143.** Friedmann D. A general overview of heterogeneous photocatalysis as a remediation technology for wastewaters containing pharmaceutical compounds. Water (Basel) [Internet]. 2022;14(21):3588. [Citado el 5 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/w14213588>
- 144.** Lin C-H, Chen W-H. Graphene family nanomaterials (GFN)-TiO<sub>2</sub> for the photocatalytic removal of water and air pollutants: Synthesis, characterization, and applications. Nanomaterials (Basel) [Internet]. 2021;11(12):3195. [Citado el 29 de julio de 2025]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/nano11123195>
- 145.** Abu-Nada A, McKay G, Abdala A. Recent advances in applications of hybrid graphene materials for metals removal from wastewater. Nanomaterials (Basel) [Internet]. 2020;10(3):595. [Citado el 29 de julio de 2025]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/nano10030595>
- 146.** Park CM, Kim YM, Kim K-H, Wang D, Su C, Yoon Y. Potential utility of graphene-based nano spinel ferrites as adsorbent and

photocatalyst for removing organic/inorganic contaminants from aqueous solutions: A mini review. *Chemosphere* [Internet]. 2019;221:392–402. [Citado el 30 de julio de 2025]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.063>

**147.** Faith K, Abdelhaleem A, Fujii M, Nasr M. Synergism of artificial intelligence and techno-economic for sustainable treatment of methylene blue dye-containing wastewater by photocatalysis. *Sustainability* [Internet]. 2024;16(2):529. [Citado el 5 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/su16020529>

**148.** Liu Z, Navik R, Tan H, Xiang Q, Wahyudiono, Goto M, et al. Graphene-based materials prepared by supercritical fluid technology and its application in energy storage. *The Journal of Supercritical Fluids* [Internet]. 2022;188(105672):105672. [Citado el 4 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105672>

**149.** Tarcan R, Todor-Boer O, Petrovai I, Leordean C, Astilean S, Botiz I. Reduced graphene oxide today. *J Mater Chem C Mater Opt Electron Devices* [Internet]. 2020;8(4):1198–224. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/dy/c9tc04916a/unauth>

**150.** Chen J, Zhou Q, Cao W. Multifunctional porphyrin-based sonosensitizers for sonodynamic therapy. *Advanced Functional Materials* [Internet]. 2024; [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.202405844>

**151.** Li Y, Zhang J, Chen Q, Xia X, Chen M. Emerging of heterostructure materials in energy storage: A review. *Adv Mater* [Internet]. 2021;33(27):e2100855. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202100855>

- 152.** Villani A. Caracterización físico-química y cerámica de hidroxiapatitas producidas por distintos métodos de síntesis: Parte II: Efectos del tratamiento térmico. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela [Internet]. 2016;30(1):201–10. [Citado el 13 de noviembre de 2024]. Disponible en: [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652015000100020](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652015000100020)
- 153.** Rani M, Shukla G, Shanker U. Sunlight-mediated efficient remediation of organic pollutants from water by nanohybrid of Prussian blue analogue decorated reduced graphene oxide. Separation and Purification Technology [Internet]. 2025;354(128742):128742. [Citado el 5 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128742>
- 154.** Razaq A, Bibi F, Zheng X, Papadakis R, Jafri SHM, Li H. Review on graphene-, graphene oxide-, reduced graphene oxide-based flexible composites: From fabrication to applications. Materials (Basel) [Internet]. 2022;15(3):1012. [Citado el 4 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15031012>
- 155.** Roy JS, Messaddeq Y. The role of solar concentrators in photocatalytic wastewater treatment. Energies [Internet]. 2024;17(16):4001. [Citado el 4 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/en17164001>
- 156.** Beura R, Pachaiappan R, Paramasivam T. Photocatalytic degradation studies of organic dyes over novel Ag-loaded ZnO-graphene hybrid nanocomposites. Journal of Physics and Chemistry of Solids [Internet]. 2021;148(109689):109689. [Citado el 5 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109689>
- 157.** Pandey AK, Reji Kumar R, B K, Laghari IA, Samykano M, Kothari R, et al. Utilization of solar energy for wastewater treatment: Challenges and progressive research trends. Journal of Environmental Management

[Internet]. 2021;297(113300):113300. [Citado el 5 de diciembre de 2024].  
Disponibile en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113300>

**158.** Bopape DA, Ntsendwana B, Mabasa FD. Photocatalysis as a pre-discharge treatment to improve the effect of textile dyes on human health: A critical review. Heliyon [Internet]. 2024;10(20):e39316. [Citado el 5 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39316>

**159.** Yasmina M, Mourad K, Mohammed SH, Khaoula C. Treatment heterogeneous photocatalysis; Factors influencing the photocatalytic degradation by TiO<sub>2</sub>. Energy Procedia [Internet]. 2014;50:559–66. [Citado el 5 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.068>

## ANEXOS

### ANEXO 1. Valores recopilados correspondientes al Rojo Congo empleando materiales basados en grafeno como fotocatalizadores

| Estudio    | Porcentaje de remoción (%) | Cinética de reacción (min <sup>-1</sup> ) | Tipo de luz | Longitud de onda (nm) | Tiempo (min) | Concentración inicial del colorante (g/L) | Fuente |
|------------|----------------------------|---|-------------|-----------------------|--------------|---|--------|
| Estudio 1  | 89                         | 0.012                                     | Luz UV      | 10 - 400              | 120          | 0.05                                      | [73]   |
| Estudio 2  | 95.6                       | 0.0459                                    | Luz visible | 400 - 700             | 60           | 0.00002                                   | [44]   |
| Estudio 3  | 93                         | 0.04432                                   | Luz solar   | 300 - 2500            | 60           | 0,0065                                    | [74]   |
| Estudio 4  | 97.5                       | 0.06148                                   | Luz solar   | 300 - 2500            | 60           | 0,035                                     | [74]   |
| Estudio 5  | 91                         | 0.02675                                   | Luz solar   | 300 - 2500            | 90           | 0.01                                      | [75]   |
| Estudio 6  | 74                         | 0.01122                                   | Luz solar   | 300 - 2500            | 120          | 0.1                                       | [76]   |
| Estudio 7  | 87.65                      | 0.03485                                   | Luz visible | 400 - 700             | 60           | 0.0225                                    | [11]   |
| Estudio 8  | 60                         | 0.139                                     | Luz UV      | 10 - 400              | 210          | 0.02                                      | [77]   |
| Estudio 9  | 97                         | 0.027                                     | Luz solar   | 300 - 2500            | 120          | 0.04                                      | [78]   |
| Estudio 10 | 78                         | 0.01682                                   | Luz visible | 400 - 700             | 90           | 0.01                                      | [79]   |
| Estudio 11 | 98.73                      | 0.109                                     | Luz visible | 400 - 700             | 40           | 0.005                                     | [80]   |
| Estudio 12 | 96                         | 0.10755                                   | Luz visible | 400 - 700             | 20           | 0.005                                     | [81]   |
| Estudio 13 | 88.66                      | 0.01736                                   | Luz solar   | 300 - 2500            | 270          | 0.05                                      | [82]   |
| Estudio 14 | 99.62                      | 0.1038                                    | Luz visible | 400 - 700             | 34           | 0.03                                      | [83]   |
| Estudio 15 | 87                         | 0.068                                     | Luz solar   | 300 - 2500            | 60           | 0.1                                       | [84]   |
| Estudio 16 | 98.7                       | 0.0641                                    | Luz visible | 400 - 700             | 120          | 0.31954                                   | [85]   |
| Estudio 17 | 98.7                       | 0.0291                                    | Luz visible | 400 - 700             | 120          | 0.4                                       | [86]   |
| Estudio 18 | 97.96                      | 0.0917                                    | Luz UV      | 10 - 400              | 60           | 0.01                                      | [87]   |
| Estudio 19 | 75                         | 0.02                                      | Luz UV      | 10 - 400              | 180          | 0.03                                      | [88]   |

|                   |              |                |                    |                   |            |              |             |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------|-------------------|------------|--------------|-------------|
| <b>Estudio 20</b> | <b>99</b>    | <b>0.0209</b>  | <b>Luz solar</b>   | <b>300 - 2500</b> | <b>100</b> | <b>0.05</b>  | <b>[89]</b> |
| <b>Estudio 21</b> | <b>98</b>    | <b>0.00037</b> | <b>Luz UV</b>      | <b>10 - 400</b>   | <b>30</b>  | <b>0.06</b>  | <b>[90]</b> |
| <b>Estudio 22</b> | <b>97.5</b>  | <b>0.037</b>   | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>20</b>  | <b>0.2</b>   | <b>[91]</b> |
| <b>Estudio 23</b> | <b>92</b>    | <b>0.00569</b> | <b>Luz UV</b>      | <b>10 - 400</b>   | <b>120</b> | <b>0.015</b> | <b>[92]</b> |
| <b>Estudio 24</b> | <b>97</b>    | <b>0.00968</b> | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>600</b> | <b>0,01</b>  | <b>[93]</b> |
| <b>Estudio 25</b> | <b>100</b>   | <b>0.05991</b> | <b>Luz solar</b>   | <b>300 - 2500</b> | <b>50</b>  | <b>0,05</b>  | <b>[94]</b> |
| <b>Estudio 26</b> | <b>92</b>    | <b>0.08419</b> | <b>Luz UV</b>      | <b>10 - 400</b>   | <b>30</b>  | <b>0.5</b>   | <b>[95]</b> |
| <b>Estudio 27</b> | <b>92</b>    | <b>0.02296</b> | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>110</b> | <b>0,03</b>  | <b>[96]</b> |
| <b>Estudio 28</b> | <b>87.65</b> | <b>0.0205</b>  | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>60</b>  | <b>0,01</b>  | <b>[97]</b> |
| <b>Estudio 29</b> | <b>98.73</b> | <b>0.10915</b> | <b>Luz UV</b>      | <b>10 - 400</b>   | <b>40</b>  | <b>0.05</b>  | <b>[98]</b> |
| <b>Estudio 30</b> | <b>87.6</b>  | <b>0.01391</b> | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>150</b> | <b>0.5</b>   | <b>[99]</b> |

**ANEXO 2. Valores recopilados correspondientes al Verde Malaquita empleando materiales basados en grafeno como fotocatalizadores**

| Estudio    | Porcentaje de remoción (%) | Cinética de reacción (min <sup>-1</sup> ) | Tipo de luz | Longitud de onda (nm) | Tiempo (min) | Concentración inicial del colorante (g/L) | Fuente |
|------------|----------------------------|---|-------------|-----------------------|--------------|---|--------|
| Estudio 1  | 80                         | 0.0674                                    | Luz visible | 400 - 700             | 40           | 0.005                                     | [100]  |
| Estudio 2  | 59                         | 0.0874                                    | Luz visible | 400 - 700             | 40           | 0.005                                     | [100]  |
| Estudio 3  | 98.96                      | 0.04836                                   | Luz visible | 400 - 700             | 40           | 0.005                                     | [100]  |
| Estudio 4  | 95                         | 0.01389                                   | Luz visible | 400 - 700             | 40           | 0.005                                     | [100]  |
| Estudio 5  | 78                         | 0.29                                      | Luz visible | 400 - 700             | 50           | 0.02                                      | [101]  |
| Estudio 6  | 90.6                       | 0.4578                                    | Luz UV      | 10 - 400              | 62           | 0.0001                                    | [102]  |
| Estudio 7  | 99.87                      | 0.0841                                    | Luz UV      | 10 - 400              | 60           | 0.4                                       | [103]  |
| Estudio 8  | 98.75                      | 0.077                                     | Luz solar   | 300 - 2500            | 30           | 0.1                                       | [104]  |
| Estudio 9  | 88                         | 0.032                                     | Luz solar   | 300 - 2500            | 60           | 0.00003                                   | [105]  |
| Estudio 10 | 97.6                       | 0.04245                                   | Luz solar   | 300 - 2500            | 90           | 0.01                                      | [106]  |
| Estudio 11 | 98                         | 0.0179                                    | Luz visible | 400 - 700             | 140          | 0.01                                      | [107]  |
| Estudio 12 | 100                        | 0.0397                                    | Luz visible | 400 - 700             | 45           | 0.67                                      | [108]  |
| Estudio 13 | 99                         | 0.0224                                    | Luz UV      | 10 - 400              | 55           | 0.0055                                    | [109]  |
| Estudio 14 | 74                         | 0.0449                                    | Luz visible | 400 - 700             | 30           | 0.005                                     | [110]  |
| Estudio 15 | 88.4                       | 0.0601                                    | Luz solar   | 300 - 2500            | 180          | 0.01                                      | [111]  |
| Estudio 16 | 99.68                      | 0.38297                                   | Luz visible | 400 - 700             | 40           | 0.05                                      | [98]   |
| Estudio 17 | 96.3                       | 0.0578                                    | Luz visible | 400 - 700             | 120          | 0.01                                      | [112]  |
| Estudio 18 | 93.34                      | 0.1806                                    | Luz visible | 400 - 700             | 150          | 0.04                                      | [113]  |
| Estudio 19 | 62.3                       | 0.0013                                    | Luz visible | 400 - 700             | 240          | 0.01                                      | [114]  |

|                   |              |                |                    |                   |              |                 |              |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------|-------------------|--------------|-----------------|--------------|
| <b>Estudio 20</b> | <b>86</b>    | <b>0.01</b>    | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>93.84</b> | <b>0.00001</b>  | <b>[115]</b> |
| <b>Estudio 21</b> | <b>91.7</b>  | <b>0.2133</b>  | <b>Luz solar</b>   | <b>300 - 2500</b> | <b>12</b>    | <b>0.02</b>     | <b>[116]</b> |
| <b>Estudio 22</b> | <b>94.48</b> | <b>0.09655</b> | <b>Luz UV</b>      | <b>10 - 400</b>   | <b>30</b>    | <b>0.5</b>      | <b>[95]</b>  |
| <b>Estudio 23</b> | <b>95.52</b> | <b>0.0266</b>  | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>180</b>   | <b>0.01</b>     | <b>[117]</b> |
| <b>Estudio 24</b> | <b>95</b>    | <b>0.03744</b> | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>80</b>    | <b>0.01</b>     | <b>[118]</b> |
| <b>Estudio 25</b> | <b>98</b>    | <b>0.0652</b>  | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>60</b>    | <b>0.02</b>     | <b>[119]</b> |
| <b>Estudio 26</b> | <b>99.11</b> | <b>0.385</b>   | <b>Luz UV</b>      | <b>10 - 400</b>   | <b>12</b>    | <b>0.01</b>     | <b>[120]</b> |
| <b>Estudio 27</b> | <b>97</b>    | <b>0.14026</b> | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>25</b>    | <b>0.005</b>    | <b>[121]</b> |
| <b>Estudio 28</b> | <b>93.61</b> | <b>0.01</b>    | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>120</b>   | <b>0.000002</b> | <b>[122]</b> |
| <b>Estudio 29</b> | <b>97.04</b> | <b>0.0135</b>  | <b>Luz UV</b>      | <b>10 - 400</b>   | <b>60</b>    | <b>0.05</b>     | <b>[123]</b> |
| <b>Estudio 30</b> | <b>90</b>    | <b>0.108</b>   | <b>Luz visible</b> | <b>400 - 700</b>  | <b>60</b>    | <b>0.02</b>     | <b>[124]</b> |

**ANEXO 3. Valores recopilados correspondientes al Rojo Congo empleando el TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador**

| <b>Estudio</b> | <b>Porcentaje de remoción (%)</b> | <b>Cinética de reacción (min-1)</b> | <b>Fuente</b> |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| Estudio 1      | 66.99                             | 0.03694                             | [125]         |
| Estudio 2      | 64.72                             | 0.03472                             | [125]         |
| Estudio 3      | 76                                | 0.013                               | [126]         |
| Estudio 4      | 65                                | 0,035                               | [127]         |
| Estudio 5      | 76.36                             | 0.008                               | [128]         |
| Estudio 6      | 67                                | 0.051                               | [129]         |
| Estudio 7      | 51.23                             | 0.0718                              | [130]         |
| Estudio 8      | 48                                | 0.02179                             | [131]         |
| Estudio 9      | 78                                | 0.02523                             | [132]         |

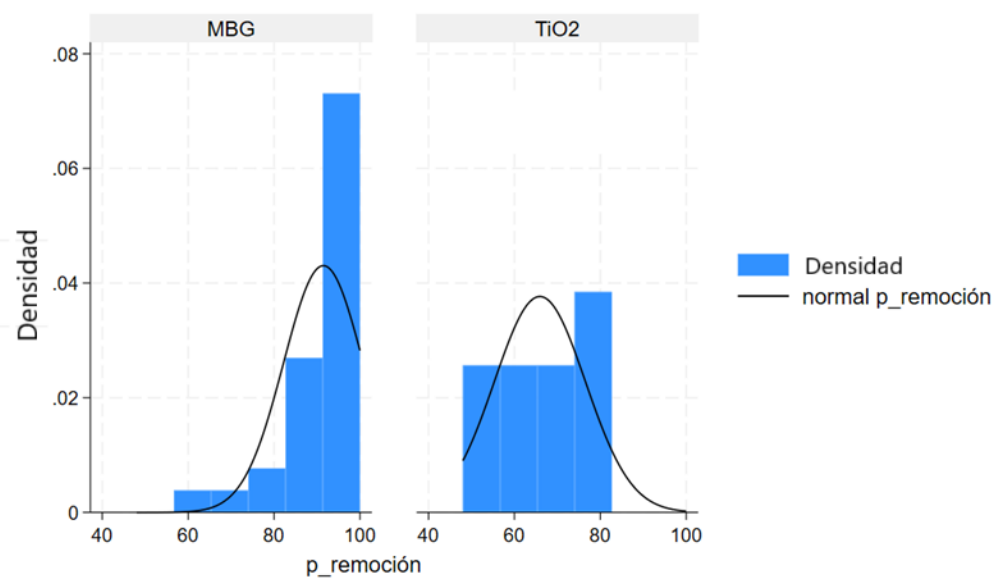
**ANEXO 4. Valores recopilados correspondientes al Verde Malaquita empleando el TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador**

| <b>Estudio</b> | <b>Porcentaje de remoción (%)</b> | <b>Cinética de reacción (min-1)</b> | <b>Fuente</b> |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| Estudio 1      | 58.19                             | 0.0664                              | [133]         |
| Estudio 2      | 11.87                             | 0.00299                             | [134]         |
| Estudio 3      | 74.7                              | 0,0016                              | [135]         |
| Estudio 4      | 68.2                              | 0,0129                              | [136]         |
| Estudio 5      | 54                                | 0,005                               | [137]         |
| Estudio 6      | 75                                | 0.0154                              | [138]         |
| Estudio 7      | 79.4                              | 0.078                               | [14]          |
| Estudio 8      | 64                                | 0.0716                              | [139]         |
| Estudio 9      | 82                                | 0.007                               | [140]         |

**ANEXO 5.** Medidas descriptivas de la variable porcentaje de remoción con relación al fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

| -> fotocatalizador = MBG  |                 |              |                  |                 |
|---------------------------|-----------------|--------------|------------------|-----------------|
| Variable                  | Media           | p50          | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                | <b>91.48667</b> | <b>94.3</b>  | <b>-1.727166</b> | <b>5.879757</b> |
| -> fotocatalizador = TiO2 |                 |              |                  |                 |
| Variable                  | Media           | p50          | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                | <b>65.92222</b> | <b>66.99</b> | <b>-.5580115</b> | <b>2.15644</b>  |

**ANEXO 6.** Histograma del porcentaje de remoción en función al fotocatalizador para la remoción del rojo congo.



**ANEXO 7.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables porcentaje de remoción y

fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

```
-> fotocatalizador = MBG
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 30  | 0.79580 | 6.490 | 3.867 | 0.00006 |

```
-> fotocatalizador = TiO2
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 9   | 0.88770 | 1.650 | 0.882 | 0.18893 |

**ANEXO 8.** Test de Bartlett entre las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

Prueba de varianzas iguales de Bartlett :  $\chi^2(1) = 0.2253$  Prob> $\chi^2 = 0.635$

**ANEXO 9.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

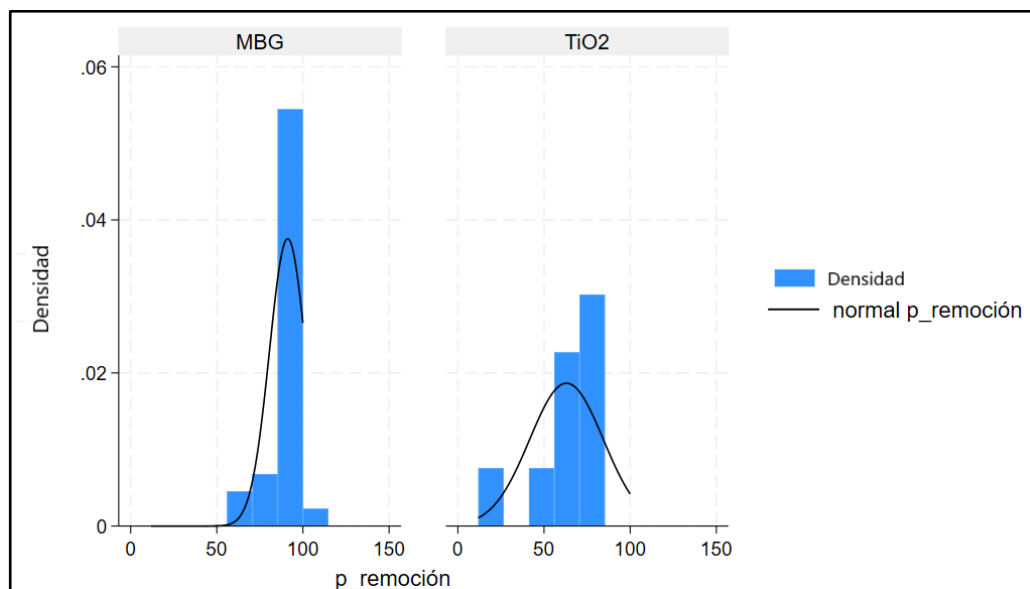
| Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis |     |                |
|--|-----|----------------|
| fotoca~r   | Obs | Suma de rangos |
| MBG  | 30  | 721.50         |
| TiO2   | 9   | 58.50          |

$\chi^2(1) = 16.402$   
 Prob = 0.0001

**ANEXO 10.** Medidas descriptivas de la variable porcentaje de remoción con relación al fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

| <code>-&gt; fotocatalizador = MBG</code>  |               |             |                  |                 |
|---|---------------|-------------|------------------|-----------------|
| Variable                                  | Media         | p50         | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                                | <b>91.142</b> | <b>95</b>   | <b>-1.766556</b> | <b>5.407835</b> |
| <code>-&gt; fotocatalizador = TiO2</code> |               |             |                  |                 |
| Variable                                  | Media         | p50         | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                                | <b>63.04</b>  | <b>68.2</b> | <b>-1.630454</b> | <b>4.779725</b> |

**ANEXO 11.** Histograma del porcentaje de remoción en función al fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.



**ANEXO 12.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

```
-> fotocatalizador = MBG
```

Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales

| Variable   | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
|------------|-----|---------|-------|-------|---------|
| p_remoción | 30  | 0.76177 | 7.572 | 4.186 | 0.00001 |

```
-> fotocatalizador = TiO2
```

Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales

| Variable   | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
|------------|-----|---------|-------|-------|---------|
| p_remoción | 9   | 0.79344 | 3.035 | 2.116 | 0.01718 |

**ANEXO 13.** Test de Bartlett entre las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

Prueba de varianzas iguales de Bartlett :  $\chi^2(1) = 7.2239$  Prob> $\chi^2 = 0.007$

**ANEXO 14.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables porcentaje de remoción y fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

**Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis**

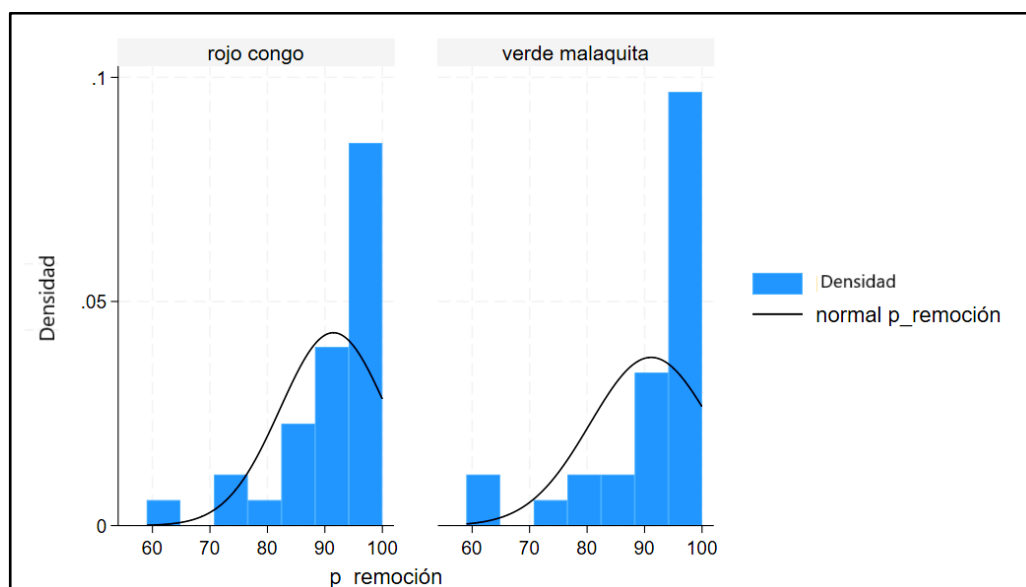
| fotoca~r | Obs | Suma de rangos |
|----------|-----|----------------|
| MBG      | 30  | 716.00         |
| TiO2     | 9   | 64.00          |

$\chi^2(1) = 14.951$   
Prob = 0.0001

**ANEXO 15.** Medidas descriptivas de la variable porcentaje de remoción con relación al tipo de colorante.

| -> colorante = rojo congo      |                 |             |                  |                 |
|--------------------------------|-----------------|-------------|------------------|-----------------|
| Variable                       | Media           | p50         | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                     | <b>91.48667</b> | <b>94.3</b> | <b>-1.727166</b> | <b>5.879757</b> |
| -> colorante = verde malaquita |                 |             |                  |                 |
| Variable                       | Media           | p50         | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                     | <b>91.142</b>   | <b>95</b>   | <b>-1.766556</b> | <b>5.407835</b> |

**ANEXO 16.** Histograma del porcentaje de remoción en función al tipo de colorante.



**ANEXO 17.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables porcentaje de remoción y tipo de colorante.

```
-> colorante = rojo congo
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 30  | 0.79580 | 6.490 | 3.867 | 0.00006 |

---

```
-> colorante = verde malaquita
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 30  | 0.76177 | 7.572 | 4.186 | 0.00001 |

**ANEXO 18.** Test de Bartlett entre las variables porcentaje de remoción y tipo de colorante.

|  |
|--|
| Prueba de varianzas iguales de Bartlett: $\chi^2(1) = 0.5314$ Prob> $\chi^2 = 0.466$ |
|--|

**ANEXO 19.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables porcentaje de remoción y tipo de colorantes

| Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis |     |                |
|--|-----|----------------|
| colorante  | Obs | Suma de rangos |
| rojo congo   | 30  | 897.00         |
| verde malaquita  | 30  | 933.00         |

$\chi^2(1) = 0.071$   
 Prob = 0.7901

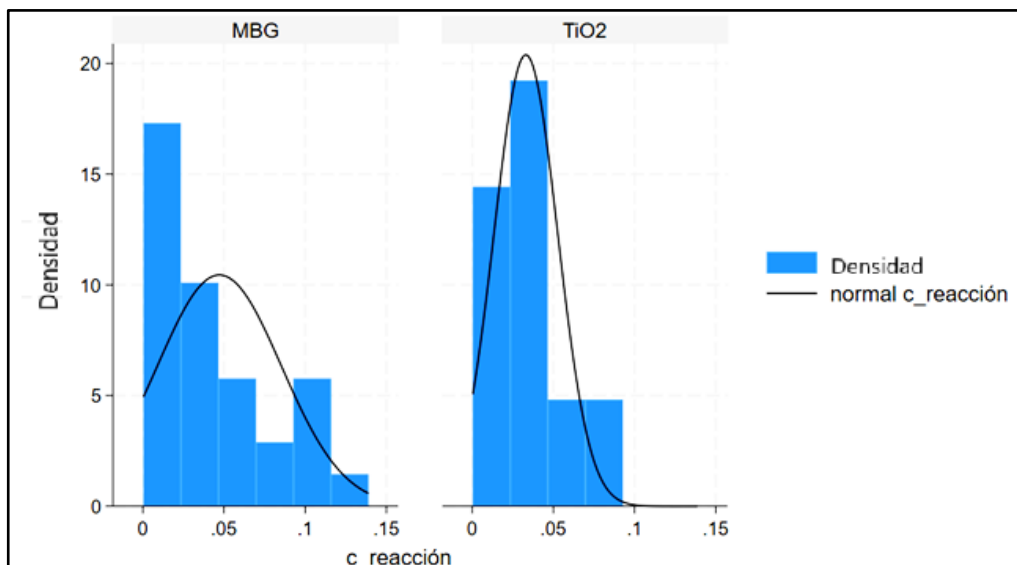
**ANEXO 20.** Medidas descriptivas de la variable cinética de reacción con relación al fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

| -> fotocatalizador = MBG |                 |                |                 |                 |
|--------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Variable                 | Media           | p50            | Asimetría       | Curtosis        |
| c_reacción               | <b>.0471403</b> | <b>.031975</b> | <b>.8234212</b> | <b>2.490725</b> |

| -> fotocatalizador = TiO2 |                 |               |                 |                 |
|---------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Variable                  | Media           | p50           | Asimetría       | Curtosis        |
| c_reacción                | <b>.0330533</b> | <b>.03472</b> | <b>.6782518</b> | <b>2.814118</b> |

**ANEXO 21.** Histograma de la variable cinética de reacción en función al fotocatalizador para la remoción del rojo congo.



**ANEXO 22.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

| -> fotocatalizador = MBG                     |     |         |       |        |         |
|--|-----|---------|-------|--------|---------|
| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |        |         |
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z      | Prob>z  |
| c_reacción                                   | 30  | 0.88652 | 3.607 | 2.653  | 0.00399 |
| -> fotocatalizador = TiO2                    |     |         |       |        |         |
| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |        |         |
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z      | Prob>z  |
| c_reacción                                   | 9   | 0.94538 | 0.803 | -0.357 | 0.63949 |

**ANEXO 23.** Test de Bartlett entre las variables cinéticas de reacción y fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

Prueba de varianzas iguales de Bartlett:  $\chi^2(1) = 4.0916$  Prob> $\chi^2 = 0.043$

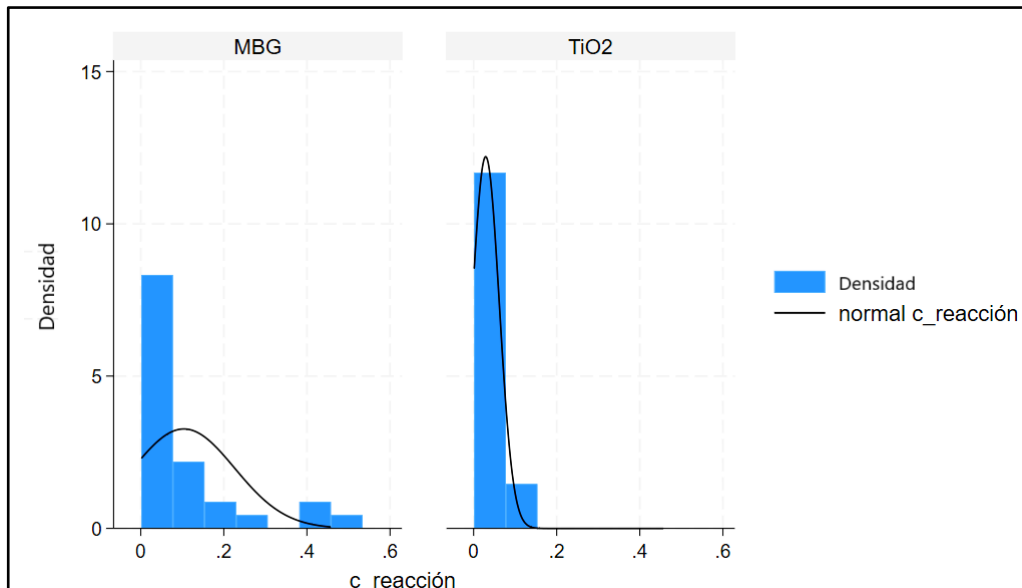
**ANEXO 24.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del rojo congo.

| <b>Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis</b> |     |                |
|---|-----|----------------|
| fotoca~r  | Obs | Suma de rangos |
| MBG   | 30  | 616.00         |
| TiO2  | 9   | 164.00         |
| $\chi^2(1) = 0.284$<br>Prob = 0.5938                                |     |                |

**ANEXO 25.** Medidas descriptivas de la variable cinética de reacción con relación al fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

| -> fotocatalizador = MBG  |                 |               |                 |                 |
|---------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Variable                  | Media           | p50           | Asimetría       | Curtosis        |
| c_reacción                | <b>.1037973</b> | <b>.05895</b> | <b>1.711313</b> | <b>4.814185</b> |
| -> fotocatalizador = TiO2 |                 |               |                 |                 |
| Variable                  | Media           | p50           | Asimetría       | Curtosis        |
| c_reacción                | <b>.0289878</b> | <b>.0129</b>  | <b>.6769018</b> | <b>1.56653</b>  |

**ANEXO 26.** Histograma de la cinética de reacción en función al fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.



**ANEXO 27.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

```
-> fotocatalizador = MBG
```

Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales

| Variable   | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
|------------|-----|---------|-------|-------|---------|
| c_reacción | 30  | 0.73395 | 8.456 | 4.414 | 0.00001 |

```
-> fotocatalizador = TiO2
```

Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales

| Variable   | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
|------------|-----|---------|-------|-------|---------|
| c_reacción | 9   | 0.75243 | 3.637 | 2.525 | 0.00579 |

**ANEXO 28.** Test de Bartlett entre las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

Prueba de varianzas iguales de Bartlett :  $\chi^2(1) = 12.2634$  Prob> $\chi^2 = 0.000$

**ANEXO 29.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables cinética de reacción y fotocatalizador para la remoción del verde malaquita.

**Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis**

| fotoca~r | Obs | Suma de rangos |
|----------|-----|----------------|
| MBG      | 30  | 669.00         |
| TiO2     | 9   | 111.00         |

$\chi^2(1) = 5.290$   
Prob = 0.0214

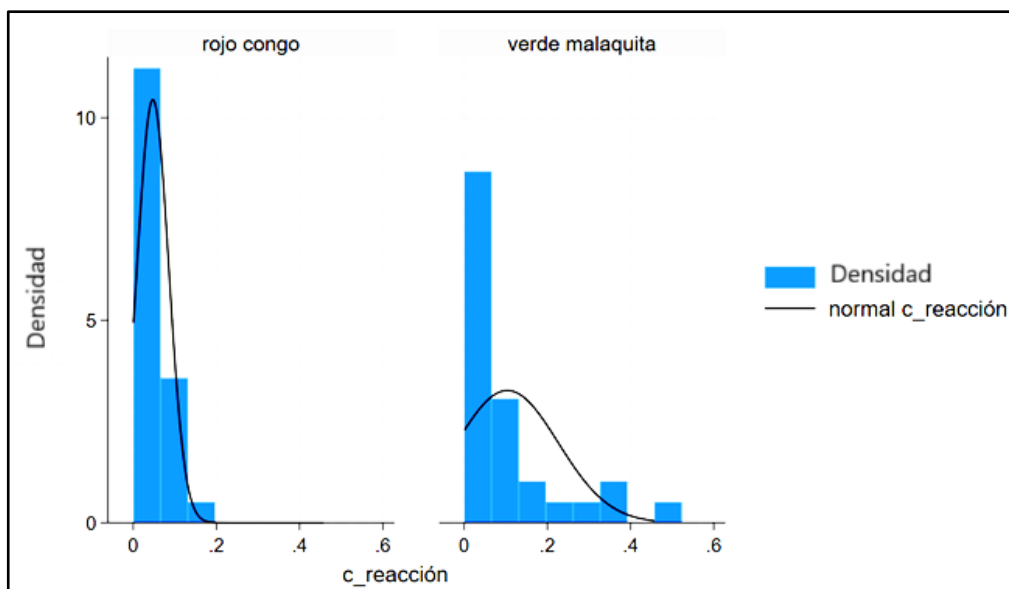
**ANEXO 30.** Medidas descriptivas de la variable cinética de reacción con relación al tipo de colorante.

| -> colorante = rojo congo |                 |                |                 |                 |
|---------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Variable                  | Media           | p50            | Asimetría       | Curtosis        |
| c_reacción                | <b>.0471403</b> | <b>.031975</b> | <b>.8234212</b> | <b>2.490725</b> |

| -> colorante = verde malaquita |                 |               |                 |                 |
|--------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Variable                       | Media           | p50           | Asimetría       | Curtosis        |
| c_reacción                     | <b>.1037973</b> | <b>.05895</b> | <b>1.711313</b> | <b>4.814185</b> |

**ANEXO 31.** Histograma de la cinética de reacción en función al tipo de colorante.



**ANEXO 32.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables cinética de degradación y tipo de colorante.

```
-> colorante = rojo congo
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| c_reacción                                   | 30  | 0.88652 | 3.607 | 2.653 | 0.00399 |

```
-> colorante = verde malaquita
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| c_reacción                                   | 30  | 0.73395 | 8.456 | 4.414 | 0.00001 |

**ANEXO 33.** Test de Bartlett entre las variables cinéticas de reacción y tipo de colorante.

Prueba de varianzas iguales de Bartlett :  $\chi^2(1) = 32.0943$  Prob> $\chi^2 = 0.000$

**ANEXO 34.** Prueba de Kruskal-Wallis entre las variables cinética de reacción y tipo de colorante.

**Prueba de rango de igualdad de poblaciones de Kruskal-Wallis**

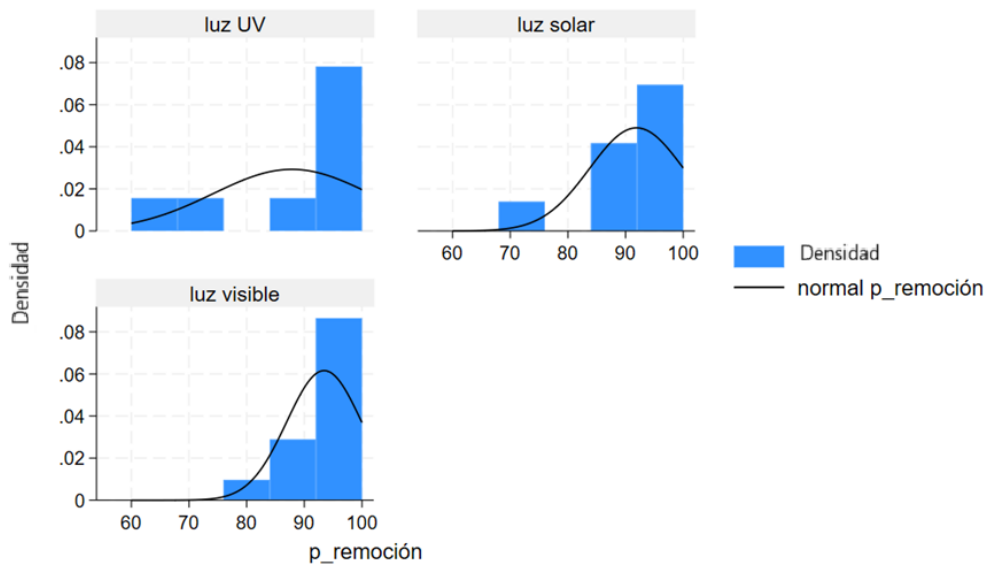
| colorante       | Obs | Suma de rangos |
|-----------------|-----|----------------|
| rojo congo      | 30  | 799.00         |
| verde malaquita | 30  | 1031.00        |

chi2(1) = **2.941**  
 Prob = **0.0863**

**ANEXO 35.** Medidas descriptivas de la variable porcentaje de remoción con relación al tipo de luz para la remoción del rojo congo.

| <code>-&gt; luz = luz UV</code>      |                 |           |                  |                 |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|------------------|-----------------|
| Variable                             | Media           | p50       | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                           | <b>87.83625</b> | <b>92</b> | <b>-1.216226</b> | <b>3.139842</b> |
| <code>-&gt; luz = luz solar</code>   |                 |           |                  |                 |
| Variable                             | Media           | p50       | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                           | <b>91.90667</b> | <b>93</b> | <b>-1.154374</b> | <b>3.583474</b> |
| <code>-&gt; luz = luz visible</code> |                 |           |                  |                 |
| Variable                             | Media           | p50       | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción                           | <b>93.44231</b> | <b>96</b> | <b>-1.104374</b> | <b>3.309899</b> |

**ANEXO 36.** Histograma de la variable porcentaje de remoción en función al tipo de luz para la remoción del rojo congo.



**ANEXO 37.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables porcentaje de remoción y tipo de luz para la remoción del rojo congo.

```
-> luz = luz UV
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 8   | 0.80673 | 2.692 | 1.828 | 0.03378 |

```
-> luz = luz solar
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 9   | 0.87318 | 1.863 | 1.112 | 0.13296 |

```
-> luz = luz visible
```

| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 13  | 0.83928 | 2.831 | 2.038 | 0.02075 |

**ANEXO 38.** Test de Bartlett entre las variables porcentaje de remoción y tipo de luz para la remoción del rojo congo.

Prueba de varianzas iguales de Bartlett :  $\chi^2(2) = 5.1724$  Prob> $\chi^2 = 0.075$

**ANEXO 39.** Medidas descriptivas de la variable porcentaje de remoción con relación al tipo de luz para la remoción del verde malaquita

| -> luz = luz UV |               |           |                  |                 |
|-----------------|---------------|-----------|------------------|-----------------|
| Variable        | Media         | p50       | Asimetría        | Curtosis        |
| p_remoción      | <b>96.612</b> | <b>99</b> | <b>-.7255274</b> | <b>1.888915</b> |

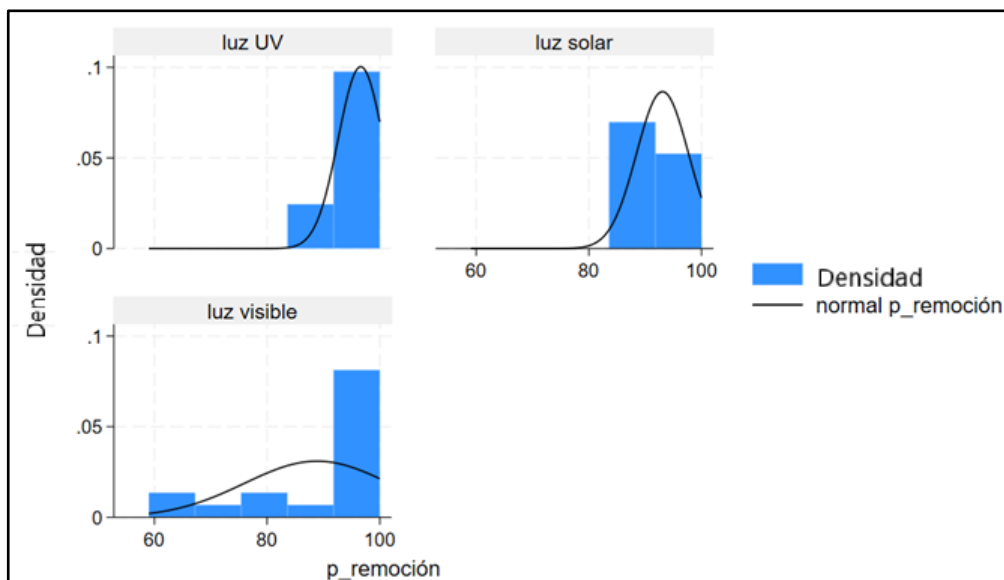
  

| -> luz = luz solar |              |             |                 |                 |
|--------------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Variable           | Media        | p50         | Asimetría       | Curtosis        |
| p_remoción         | <b>93.07</b> | <b>91.7</b> | <b>.1382489</b> | <b>1.268374</b> |

| -> luz = luz visible |                 |           |                  |                |
|----------------------|-----------------|-----------|------------------|----------------|
| Variable             | Media           | p50       | Asimetría        | Curtosis       |
| p_remoción           | <b>88.87278</b> | <b>95</b> | <b>-1.238391</b> | <b>3.24513</b> |

**ANEXO 40.** Histograma de la variable porcentaje de remoción en función al tipo de luz para la remoción del verde malaquita.



**ANEXO 41.** Prueba de Shapiro-Wilk entre las variables porcentaje de remoción y tipo de luz para la remoción del verde malaquita

| -> luz = luz UV                              |     |         |       |       |         |
|--|-----|---------|-------|-------|---------|
| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 5   | 0.83766 | 1.916 | 1.000 | 0.15857 |
| -> luz = luz solar                           |     |         |       |       |         |
| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 7   | 0.86232 | 1.808 | 0.999 | 0.15878 |
| -> luz = luz visible                         |     |         |       |       |         |
| Prueba W de Shapiro-Wilk para datos normales |     |         |       |       |         |
| Variable                                     | Obs | W       | V     | z     | Prob>z  |
| p_remoción                                   | 18  | 0.78987 | 4.619 | 3.063 | 0.00110 |

**ANEXO 42.** Test de Bartlett entre las variables porcentaje de remoción y tipo de luz para la remoción del verde malaquita

|   |
|---|
| Prueba de varianzas iguales de Bartlett: $\chi^2(2) = 10.2544$ Prob> $\chi^2 = 0.006$ |
|---|