



The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

TREATMENT PROCESS BY ELECTROCOAGULATION AND VISIBLE SOLAR RADIATION OF AN AQUEOUS SOLUTION MODEL OF THE DISPERSED TEXTILE DYE “TAICRON-RED”

PROCESO DE TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN Y RADIACIÓN SOLAR VISIBLE DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA MODELO DEL COLORANTE TEXTIL DISPERSO “TAICRON-RED”

Lia Concepción-Gamarra^{1,2*}, Luz Castañeda-Pérez³ & Luis Carrasco-Venegas⁴

¹ Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.


² Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: lconcepciong@unmsm.edu.pe


³ Red RIDIEP, Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. E-mail: lcastaneda@unfv.edu.pe

⁴ Centro de Bioenergía, Universidad Nacional del Callao, Red RIDIEP, Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. E-mail: lcarrascov@unac.edu.pe

* Corresponding author: lconcepciong@unmsm.edu.pe

Lia Concepción-Gamarra:  <https://orcid.org/0000-0001-5069-5769>

Luz Castañeda-Pérez:  <https://orcid.org/0000-0001-6684-8205>

Luis Carrasco-Venegas:  <https://orcid.org/0000-0002-7832-3366>

ABSTRACT

The textile industry, one of the fastest-growing industries, faces major challenges related to the color persistence of products and the treatment of wastewater generated during processing. The discoloration of the dyes used, such as “Taicron Red”, is a major problem, as these dyes are chemically stable and difficult to remove. It is therefore essential to develop effective and sustainable methods for their treatment. The objective of this study was to evaluate the efficiency of a treatment system for the removal of textile dye “Taicron Red” in model solutions, using sustainable processes powered by solar energy. For this purpose, an electrolytic cell powered by a solar panel and a photoreactor whose pump is also driven by solar energy were designed and built. The treatment consisted of an electrocoagulation process with aluminum anodes, applying a potential difference of 12 volts for 40 min, which reduced the Chemical Oxygen Demand (COD) of the solution from 5216.7 ppm to an initial value that allowed a second electrocoagulation. Subsequently, the solution was treated in the photoreactor for 180 min using 100 mg of Fe(II), 12 ml/L of H₂O₂, pH = 3 and TiO₂ at 100 ppm, achieving a 60% COD removal (removing 3129.2 ppm) and 90.68% of the color. In a second treatment, increasing the concentration of TiO₂ to 1000 ppm, 84% COD removal (removing 4381.4 ppm), and 99.38% color removal were achieved. The results demonstrated that the proposed system is highly efficient for the removal of textile dye and COD,



reaching high removal percentages in both cases and that the use of solar energy in conjunction with electrocoagulation and photocatalysis processes is a viable and sustainable alternative for treating wastewater in the textile industry.

Keywords: aqueous solution – electrocoagulation – Treatment – visible solar radiation

ABSTRACT

La industria textil, una de las de mayor crecimiento, enfrenta grandes desafíos relacionados con la persistencia del color de los productos y el tratamiento de aguas residuales generadas durante su proceso. La decoloración de los colorantes utilizados, como el “Taicron Red”, es un problema importante, ya que estos colorantes son químicamente estables y difíciles de eliminar. Por ello, es fundamental desarrollar métodos eficaces y sostenibles para su tratamiento. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de un sistema de tratamiento para la remoción de colorante textil “Taicron Red” en soluciones modelo, utilizando procesos sostenibles alimentados por energía solar. Para ello, se diseñó y construyó una celda electrolítica alimentada por panel solar y un fotorreactor cuya bomba también es impulsada por energía solar. El tratamiento consistió en un proceso de electrocoagulación con ánodos de aluminio, aplicando una diferencia de potencial de 12 voltios durante 40 min, lo que redujo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la solución de 5216,7 ppm a un valor inicial que permitió una segunda electrocoagulación. Posteriormente, la solución fue tratada en el fotorreactor durante 180 minutos utilizando 100 mg de Fe (II), 12 ml/L de H₂O₂, pH = 3 y TiO₂ a 100 ppm, logrando una remoción del 60% de la DQO (removiendo 3129,2 ppm) y del 90,68% del color. En un segundo tratamiento, incrementando la concentración de TiO₂ a 1000 ppm, se alcanzó una remoción del 84% de la DQO (removiendo 4381,4 ppm) y una remoción del color del 99,38%. Los resultados demostraron que el sistema propuesto es altamente eficiente para la remoción de colorante textil y DQO, alcanzando altos porcentajes de remoción en ambos casos, y que el uso de energía solar en conjunto con los procesos de electrocoagulación y fotocatalisis resulta ser una alternativa viable y sostenible para tratar aguas residuales en la industria textil.

Palabras clave: electrocoagulación – radiación solar visible – solución acuosa – Tratamiento

INTRODUCCIÓN

La industria textil genera efluentes acuosos durante procesos como tinción y acabados, que contienen productos químicos tóxicos, como tintes, blanqueadores y metales pesados. Estos efluentes son difíciles de biodegradar y afectan la calidad del agua residual, que suele ser muy coloreada y contener nutrientes y sólidos en suspensión. Es crucial implementar tratamientos adecuados para reducir la contaminación y cumplir con las regulaciones ambientales (López & Crespi, 2015).

Los residuos textiles afectan los cuerpos de agua, causando eutrofización y contaminación por microplásticos debido a la descomposición de fibras sintéticas, lo que impacta la biodiversidad y la salud humana, especialmente en comunidades dependientes de estos recursos hídricos. Esto subraya la necesidad de una gestión sostenible en la industria textil (Fluence Corp Ltd, 2018).

El tratamiento de estas aguas residuales es complejo debido a la presencia de contaminantes peligrosos. Métodos avanzados como la electrocoagulación (EC), que utiliza electrodos para generar coágulos metálicos que atrapan los contaminantes, se han destacado por su efectividad en la eliminación de estos compuestos tóxicos.

El uso de electrocoagulación para tratar aguas residuales con tintes ha sido estudiado por Alizadeh *et al.* (2015), quienes encontraron que los electrodos de hierro lograron una remoción del 100% del azul de metileno, pero el proceso consume mucha energía, limitando su aplicación a gran escala.

Se ha aplicado coagulación/floculación seguida de oxidación electroquímica para tratar efluentes textiles, mejorando la eficiencia del tratamiento y reduciendo la contaminación del agua (Torres *et al.*, 2019; GilPavas *et al.*, 2020; Suárez-Escobar *et al.*, 2016).

Se ha combinado la electrocoagulación con un tratamiento enzimático usando Lacasa, lo que mejora la descomposición de los tintes. Sin embargo, se ha señalado que el proceso sigue siendo costoso en energía y genera mucho lodo, lo que requiere soluciones más eficientes y sostenibles (Kalia *et al.*, 2023).

El proceso híbrido de electrocoagulación y electrooxidación (EC-EO), ha sido evaluado por Asfaha *et al.* (2022) para tratar aguas residuales textiles de la industria algodonera. Este enfoque reduce eficazmente la demanda química de oxígeno (DQO), el carbono orgánico total (COT) y la intensidad del color. Utilizando electrodos de aluminio y dióxido de iridio recubiertos de titanio, el estudio optimizó parámetros como la densidad de corriente, el pH y el tiempo de electrólisis para mejorar la eficiencia del tratamiento.

Bener *et al.* (2019) también investigaron el uso de electrocoagulación en aguas residuales textiles reales, evaluando su impacto en la eliminación de COT. Otros estudios han combinado electrocoagulación con ozonización o adsorción para mejorar la remoción de contaminantes y optimizar el rendimiento del tratamiento (Tezcan & Aytac, 2013; Bulca *et al.*, 2021; Ahangarnokolaei *et al.*, 2021).

Además de la electrocoagulación, se han desarrollado otros métodos avanzados como la fotocatalisis. Zhang *et al.* (1998) investigaron la degradación de eosina con TiO_2 bajo luz visible, concluyendo que mejora la descomposición del colorante en medios ácidos. Ambaye & Hagos (2020) combinaron TiO_2 con un tratamiento biológico aeróbico para decolorar tintes azo en aguas residuales textiles, logrando una reducción significativa de la DQO y alta eliminación del color.

Bilińska *et al.* (2019) investigaron el uso combinado de electrocoagulación y ozonización para la reutilización de aguas residuales textiles, mientras que Zazou *et al.* (2019) aplicaron electrocoagulación con oxidación avanzada. Otros enfoques integrados incluyen tratamientos químicos y biológicos (Ledakowicz *et al.*, 2001) y un sistema continuo de electrocoagulación para la desalinización parcial de agua en las turberas costeras de Sarawak (Abdul-Rahman *et al.*, 2023).

La fotocatalisis ha demostrado ser efectiva para eliminar contaminantes en aguas residuales cuando se combina con otros tratamientos. Se ha utilizado el TiO_2 para la fotodegradación del colorante Remazol Red 133, alcanzando una decoloración del 97,9% y una degradación del 87,6% en 120 min (Gümüş & Akbal,

2011). Se ha investigado la degradación fotocatalítica de varios colorantes comerciales con TiO_2 bajo irradiación solar, observando que la decoloración fue más rápida que la mineralización (Wang, 2000). La estructura de TiO_2 influye en su rendimiento fotocatalítico (Nakata & Fujishima, 2012), optimizando los procesos de tratamiento (Minero, 1995). Se ha desarrollado un tratamiento de reducción química para el colorante azoico Disperse Blue 79 (Weber & Adams, 1995). Rodríguez *et al.* (2002) y Ribeiro *et al.* (2017) estudiaron el tratamiento foto-Fenton de efluentes textiles, evaluando la biodegradabilidad de las soluciones tratadas. Se ha investigado el destino de los colorantes azoicos en los lodos generados durante el tratamiento, proporcionando información sobre su impacto ambiental (Ganesh *et al.*, 1994).

El tratamiento de aguas residuales textiles ha avanzado con métodos como la electrocoagulación y la fotocatalisis, combinados con procesos como la oxidación electroquímica y la biocatálisis. Aunque estos métodos son efectivos para eliminar contaminantes, presentan limitaciones en el consumo de energía y la generación de lodos. Los estudios continúan buscando formas de optimizar estos procesos para hacerlos más eficientes y sostenibles. La investigación se centra en el tratamiento de una solución modelo de colorante textil denominado "taicron red", utilizando la electrocoagulación seguida de tratamiento por radiación solar visible, con un sistema de energía solar para alimentar ambos procesos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Panel solar

Fue adquirido de la empresa Electronic Siblings SAC., con estimaciones de potencia y autonomía de alrededor de 8 h a una tasa de consumo de 4 A-h, con la finalidad de que la batería este cargada a un 50%. Las dimensiones son 1,80 m x 1,10 m; la potencia de 405 W; una batería de 150 A-h y un controlador de 10 A-h. La estructura fue diseñada convenientemente para orientar el panel de forma manual en la dirección de la radiación solar. Este equipo se utiliza con la finalidad de proveer energía para la electrocoagulación, el bombeo de fluidos y agitación durante la electrocoagulación. La figura 1 muestra el panel solar que permite hacer el seguimiento de forma manual en la dirección del sol.



Figura 1. Panel solar.

Celda electrolítica

Es una cubeta de plástico de 31 cm de longitud, 21 cm de ancho y 18 cm de altura cuya capacidad de operación es de 10 L, a la cual se acondicionó dos barras conductoras de cobre para soportar los electrodos. Los electrodos están constituidos de siete electrodos (3 electrodos de

aluminio y 4 electrodos de acero de 10 cm de ancho y 12 cm de altura), los cuales se colocan en forma alternada considerando que los electrodos de aluminio estén ubicados siempre entre dos electrodos de acero. El esquema ensamblado se muestra en la figura 2.



Figura 2. Celda electrolítica con cátodos de acero y ánodos de aluminio.

Fotorreactor

Ha sido diseñado y construido específicamente para esta investigación; consta de 5 unidades idénticas dispuestas en forma paralela; sin embargo, su funcionamiento es en serie; cada una de estas unidades son idénticas y consta de dos elementos el tubo y el paraboloide (involuta+ parábola), cuyas ecuaciones de diseño son las siguientes:

La ecuación del tubo de vidrio borosilicato cuyo radio es r , viene dada por:

$$x = r \cos(\theta), \quad y = r \sin(\theta), \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

La ecuación de la involuta esta dadá por

$$x = r(\sin \theta_{COB} - \theta_{COB} \cos \theta_{COB}) \quad y = -r(\theta_{COB} \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB}) \quad 0 \leq \theta_{COB} \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a$$

Y la parábola

$$x = r(\sin \theta_{COB} - A \cos \theta_{COB}) \quad y = -r(A \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB})$$

$$A = \frac{\pi / 2 + \theta_{COB} + \theta_a - \cos(\theta_{COB} - \theta_a)}{1 + \sin(\theta_{COB} - \theta_a)} \quad \frac{\pi}{2} + \theta_a \leq \theta_{COB} \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a$$

Es un dispositivo de acero inoxidable brillante que consta de cinco unidades dispuestas en serie de 1 m de longitud y 22 mm. de diámetro cada uno, ensamblado en un soporte móvil, capaz de seguir la dirección del sol con la finalidad de captar la máxima energía radiante posible.

El conjunto se denomina colector parabólico compuesto o CPC, con capacidad de multiplicar la concentración solar 2,5 veces la radiación del momento; el equipo parcialmente ensamblado se muestra en la figura 3.



Figura 3. Fotorreactor de acero inoxidable brillante.

Equipos auxiliares

Bombas: Se ubicó dos bombas; una bomba es utilizada como un sistema de agitación de la celda electrolítica mediante la circulación del fluido dentro de la misma cubeta y la segunda bomba tiene la finalidad de suministrar energía al fluido que se desplaza por el fotorreactor; la fuente de alimentación es de corriente continua de 12 voltios y utiliza la energía del panel solar; capacidad: 3,5 L/min; presión ejercida de 0,48 MPa y consumo de energía de 2 A.

Termocuplas: Se instaló una serie de termocuplas para sensar la temperatura del fotorreactor en diferentes puntos durante el proceso de tratamiento con el reactor solar, incluido los puntos de entrada y salida.

Pirómetro: Se colocó cerca de la zona donde se estuvo llevando a cabo el proceso de degradación en el fotorreactor con la finalidad de conocer el valor medio de la radiación UV y visible que se produce en el espectro electromagnético.

El equipo completo instalado se observa en la figura 4.

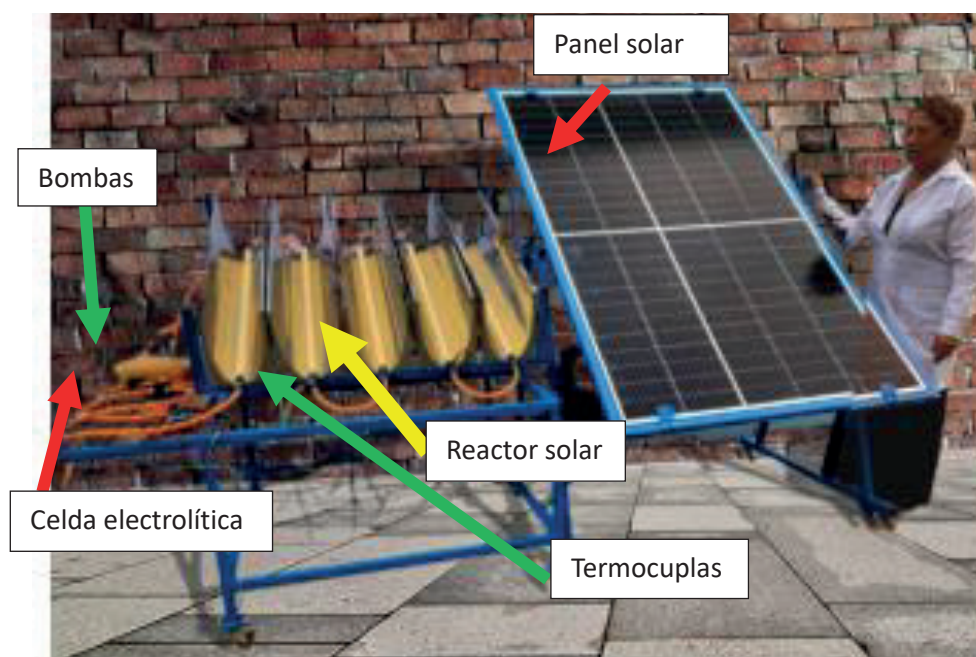


Figura 4. Equipo completo de electrocoagulación y radiación solar visible.

Métodos

Se realizó el tratamiento de una solución modelo del colorante disperso "taicron-red" de concentración de 1 g/L.

Procedimiento de la electrocoagulación

Primera electrocoagulación

Se preparó 10 L de una solución de colorante disperso "taicron red" de 1g/L. Se observa la intensidad de color debido a su concentración elevada la misma que se observa en la figura 5.



Figura 5. Solución acuosa de colorante "taicron-red" de 1g/L.

Ambas soluciones fueron sometidas a una primera electrocoagulación por 40 min en la celda electrolítica descrita anteriormente, lo cual permitió disminuir la intensidad de color; una parte por flotación debido a la formación de productos de baja densidad y por sedimentación por el hidróxido de aluminio formado durante el proceso de electrólisis.

Segunda electrocoagulación

El producto obtenido del tratamiento por electrocoagulación fue filtrado convenientemente y se sometió a una segunda electrocoagulación por 40 min con la finalidad de eliminar el colorante remanente y los posibles aditivos que puedan contener; se utilizó el mismo equipo de la primera electrocoagulación y las mismas condiciones de intensidad de corriente de 4 A y 12 V.

El proceso de electrocoagulación tanto de la primera como de la segunda electrocoagulación de las soluciones

de 1 g/L de colorante se realizó por triplicado; luego de la segunda electrocoagulación y filtrado, se mezcló las tres soluciones obteniendo alrededor de 27 L con los cuales se procedió al tratamiento fotofenton heterogéneo mediante el uso del reactor solar (Ribeiro *et al.*, 2017).

Tratamiento de la solución filtrada en el fotorreactor

El valor medio de radiación solar fue de 1000W/m², los experimentos se realizaron en el periodo de 11 h a 15 h y fue medido con un piranómetro (Hukseflux Thermal Sensor Pyranometer, fabricado en Países Bajos) que se dispone para tal fin. Este nivel de radiación fue apropiado para el desarrollo de esta investigación.

La solución mezclada proveniente de la segunda electrocoagulación tiene un pH de 7, la misma que fue separada en tres partes de 9 L cada una; el pH fue ajustado a 3 para el proceso de fotooxidación (Gümüş & Akbal, 2011). Se obtiene este valor, agregando una pequeña proporción de ácido sulfúrico concentrado; se adiciona peróxido de hidrógeno 30% en volumen a una tasa de 12 ml/L de solución del colorante taicron red a tratar; sulfato ferroso heptahidratado 100 mg/L; nano partículas de dióxido de titanio de 25-50 nm en forma de anatasa a razón de 100 mg/L. Esta mezcla se realizó en una cubeta, la cual fue succionada con la bomba y se hace circular por el fotorreactor a una tasa de 3L/min durante 180 min y muestreos realizados cada 30 min. Se procedió del mismo modo con la solución de 0,5 g/L, luego de haber sido sometida a una segunda electrocoagulación.

Las mezclas obtenidas, se someten a un tratamiento alcalino para modificar el pH y a la vez eliminar el hierro proveniente del tratamiento en el fotorreactor, luego se filtra para su análisis y evaluación respectiva.

En caso de verificar que los valores no están por debajo de los límites máximos permisibles, se procede a un segundo tratamiento de fotooxidación. Los análisis químicos de la demanda química de oxígeno, fueron llevados a cabo en la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Aspectos éticos: En la elaboración del proyecto se utilizaron citas y referencias auténticas y no se realizaron cambios en los resultados obtenidos para no manipular la información durante el trabajo de investigación. Los datos y resultados fueron obtenidos según el desarrollo de la investigación y validados en un laboratorio certificado.

RESULTADOS

Primera electrocoagulación

Durante el proceso de electrocoagulación se producen una serie de cambios físicos tal como se observa en la figura 6; una parte del floculo formado (hidróxido de aluminio en el ánodo) precipita al fondo del tanque y otra parte es arrastrada hacia la parte superior (por el hidrógeno formado en el cátodo), haciendo que parte del floculo tenga baja densidad y quedando en la superficie que luego es retirado manualmente.



Figura 6. Proceso de electrocoagulación del colorante taicron-red 1g/L.

Luego del proceso de electrocoagulación por el periodo antes indicado, se retiran los electrodos y el floculo sobrenadante se retira manualmente con una espátula tal como se observa en la figura 7 para permitir que quede solo el floculo sedimentable.



Figura 7. Floculo sobrenadante para su retiro manual.

Una vez retirado el floculo sobrenadante se deja en reposo para que la decantación del hidróxido de aluminio unido al colorante por fuerzas electrostáticas (figura 8).



Figura 8. Proceso de decantación del floculo (hidróxido de aluminio + colorante disperso).

Luego del proceso de decantación, se somete a la filtración con la finalidad de eliminar los residuos sólidos (floculo decantado).

Durante esta primera electrocoagulación se retira una gran cantidad del colorante; sin embargo, aún quedan restos de colorante que son observables por el ojo humano; por tal motivo la solución filtrada se somete a una segunda electrocoagulación.

Segunda electrocoagulación

Se observa el desarrollo del proceso de la segunda electrocoagulación, donde el agua tratada visiblemente con menor contenido proveniente de la primera electrocoagulación es sometida al proceso observándose que aún quedan residuos remanentes (figura 9).

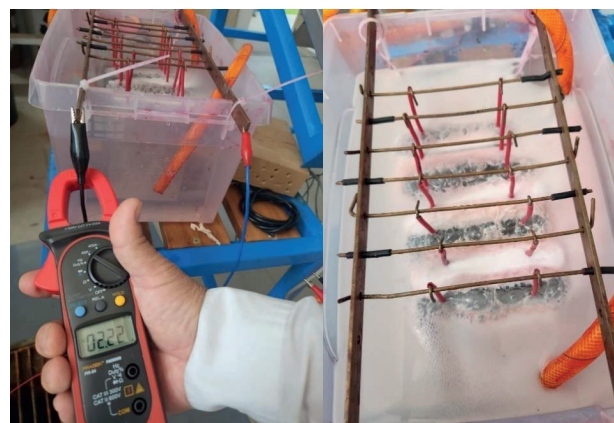


Figura 9. Segunda electrocoagulación del líquido filtrado.

Luego de culminado el proceso de electrocoagulación se elimina la espuma sobrenadante y se deja decantar la

solución (figura 10).



Figura 10. Proceso de decantación proveniente de la segunda electrocoagulación.

Luego de la decantación y filtrado, el agua queda visualmente limpia; sin embargo, debido a los componentes no coloreados, es posible que haya otras sustancias aun sin remover.

Se observa el detalle de la solución circulante a través del fotorreactor, el cual es alimentado desde un depósito rectangular y recirculado hacia el mismo con la finalidad que la solución pueda tener un tiempo de residencia apropiado (Figura 11).

Tratamiento en el fotorreactor

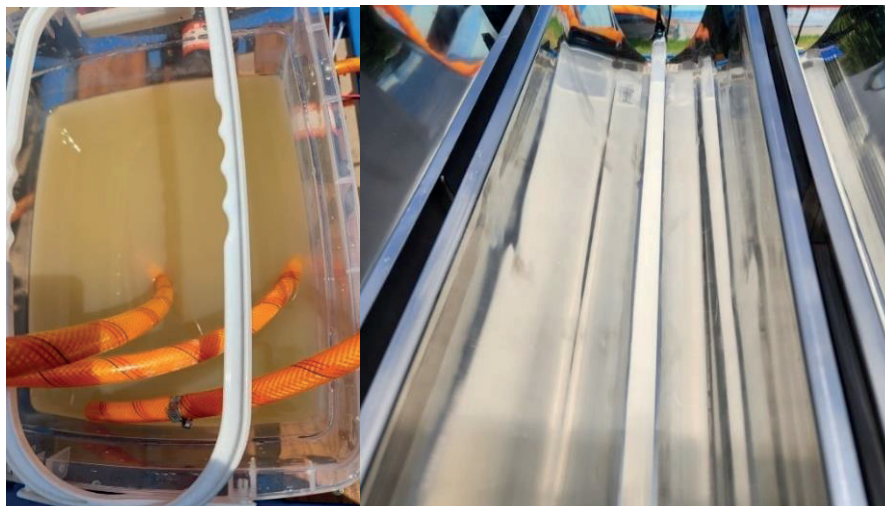


Figura 11. Solución circulante sometido a la foto oxidación.

Se procede del mismo modo para las otras dos porciones y luego los productos finales se mezclan y se obtiene una solución cuyas propiedades corresponden a los

valores medios del proceso. La solución final es filtrada y almacenada para los análisis químicos respectivos.

Tabla 1. Datos reportados de DQO (Demanda Química de Oxígeno) para la muestra de 1g/L de colorante proveniente de la solución mezclada de la segunda electrocoagulación

Tiempo (min)	DQO (mg O ₂ /L)
0	5216,7*
30	4683
60	3950
90	3716,7
120	2383,3
150	2316,7
180	2050

(*) Muestra inicial después de la segunda electrocoagulación

Se observa la evolución temporal de la DQO, con una tendencia a la mineralización continua, hasta llegar a un valor cercano a 2000 ppm., cuyo valor disminuyó desde un valor por encima de 5000 ppm (Tabla 1).

Paralelamente fue leída la absorbancia a 530 nm (región visible) en un espectrofotómetro. Los resultados se muestran en la tabla 2, con un valor decreciente de la intensidad de coloración tendiente a una cinética de primer orden, reportándose una remoción de 90,68% del color en un periodo de 3 h.

Tabla 2. Datos registrados de absorbancia a 530 nm para el colorante textil "taicron red" de concentración inicial 1 g/L y TiO₂

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% de Remoción
0	0,098	0,285070	71,49
30	0,084	0,244370	75,56
60	0,079	0,229835	77,01
90	0,064	0,186227	81,37
120	0,055	0,160063	83,99
150	0,04	0,119363	88,06
180	0,03	0,093199	90,68

Como consecuencia de los resultados obtenidos cuyos valores se encuentran por encima de los límites máximos permisibles se procedió a neutralizar el hierro remanente mediante la adición controlada de hidróxido de sodio hasta obtener un pH de 9. La solución filtrada fue

sometida a un segundo tratamiento utilizando TiO₂ a una concentración de 1000 ppm; es decir, la nueva dosificación fue la siguiente: 100 mg de Fe (II), 12ml/L de H₂O₂, pH=3, TiO₂=1000 ppm (tabla 3).

Tabla 3. Resultado del análisis luego de un segundo tratamiento por fotooxidación con TiO₂.

Tiempo de tratamiento (min)	DQO resultante (ppm)
0	2050
30	1056,7
60	990
90	943,3
120	916,7
150	863,3
180	850

En la tabla 3 se observa que los niveles de DQO a 1 hora de tratamiento se encuentra por debajo de los niveles máximos permisibles.

La lectura de la absorbancia en función del tiempo fue leída en un espectrofotómetro UV a 530 nm cuyo resultado se muestra en la Tabla 4

Tabla 4. Resultados de análisis de concentración y porcentaje de remoción de colorante

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% Remoción
0	0,047	0,136806	72,63
30	0,02	0,058313	88,33
60	0,012	0,035056	92,98
90	0,011	0,032149	93,57
120	0,009	0,026335	94,73
150	0,004	0,011799	97,64
180	0,001	0,003078	99,38

En general se ha observado que a pesar de que las dos electrocoagulaciones eliminan gran cantidad del colorante cuyo contenido se puede expresar en intensidad de coloración y niveles de DQO. Luego de la segunda electrocoagulación la DQO tiene un valor mayor a 5000 ppm. Y luego de someterlo al tratamiento en el fotorreactor con 100 ppm de nanopartícula de dióxido de titanio, luego de 3 h se alcanza un valor de 2050 ppm de DQO y una remoción de color de 90,68%; al someter a un segundo tratamiento en el fotorreactor incrementando la concentración de nanopartícula de TiO₂ a 1000 ppm, luego de 3 h se obtuvo un DQO remanente de 850 ppm y una remoción de color del 99,38%. Todo esto muestra que este colorante “*taicron red*” es bastante resistente al tratamiento. Sin embargo, cabe mencionar que un residuo industrial tiene una concentración inicial mucho menor a la propuesta y se espera que requiera mucho menos tratamientos que los desarrollados en este trabajo.

DISCUSIÓN

En la presente discusión se abordan los resultados obtenidos en este trabajo y los desarrollados por Aquino (2017), Suárez-Escobar (2016), y Shams *et al.* (2021), comparando los enfoques y hallazgos para el tratamiento de aguas residuales textiles mediante procesos como la electrocoagulación, fotocátalisis y sus combinaciones. Cada uno de estos estudios aporta perspectivas valiosas sobre la efectividad de estos métodos, destacando tanto las similitudes como las diferencias en la eficiencia, los tiempos de tratamiento, y las condiciones experimentales.

El presente estudio se centró en un sistema combinado de electrocoagulación y fotocátalisis utilizando energía solar, con el objetivo de remover colorantes textiles y reducir la DQO de las soluciones modelo; se logró una alta eficiencia en la remoción de color, alcanzando un 99,38% de eliminación del colorante “*Taicron Red*” y una reducción de la DQO del 84% al aumentar la

concentración de TiO_2 en el fotorreactor. Además, la combinación de energía solar con estos procesos mejoró la sostenibilidad del tratamiento, demostrando que el sistema propuesto es eficiente y ecológicamente viable para la industria textil. Estos resultados fueron superiores a los de estudios previos, y particularmente a los obtenidos por Aquino, quien utilizó fotocatalisis para tratar un efluente textil artesanal. Aquino obtuvo una remoción del 93,02% de DQO y del 66,62% del color en 4 h de tratamiento, lo que sugiere que, aunque la fotocatalisis fue efectiva, los resultados no fueron tan altos como los de encontrados en este trabajo, posiblemente debido a las diferentes condiciones experimentales, como la menor concentración de TiO_2 utilizada por Aquino y las características del efluente real tratado.

En cuanto al enfoque de Suárez-Escobar *et al.* (2016), quienes emplearon un proceso combinado de electrocoagulación y fotocatalisis para tratar aguas residuales litográficas, los resultados mostraron una remoción del 65% de carbono orgánico total (TOC) en 30 min mediante electrocoagulación, y un 25% adicional con fotocatalisis. Aunque Suárez-Escobar *et al.* (2016) lograron una mejora significativa en la calidad del agua tratada, sus niveles de remoción fueron inferiores a los obtenidos en este trabajo, probablemente debido a los menores tiempos de tratamiento y a la optimización limitada de las condiciones experimentales. La investigación de Suárez-Escobar destaca la importancia de ajustar variables como la concentración de TiO_2 y el pH, pero los resultados sugieren que, con tiempos de tratamiento más prolongados y un mayor número de ciclos de tratamiento, la remoción podría haber sido más efectiva.

Por su parte, Shams *et al.* (2021) utilizaron un proceso combinado de electrocoagulación y fotocatalisis con el material dopado $\text{Ag/g-C}_3\text{N}_4$ para tratar el colorante azo carmoisina, observando una eficiencia de eliminación del 37% utilizando electrodos de hierro-hierro, y del 23% con electrodos de aluminio-aluminio. Aunque el sistema propuesto por Shams *et al.* (2021) fue eficaz para la remoción de contaminantes, los resultados de su investigación mostraron una eficiencia significativamente menor en comparación con los obtenidos en este trabajo, lo que podría deberse a la mayor complejidad del material fotocatalítico utilizado por Shams *et al.* (2021), así como a la diferencia en las técnicas experimentales y en la naturaleza de los contaminantes tratados. A diferencia de Shams *et al.* (2021), en este trabajo se empleó un sistema más sencillo con TiO_2 y H_2O_2 en concentraciones más altas, lo que permitió alcanzar una mayor eficiencia en la remoción del colorante y la DQO en menos tiempo.

Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

LCG = Lia Concepción-Gamarra

LCP = Luz Castañeda-Pérez

LCV = Luis Carrasco-Venegas

Conceptualization: LCG,LCP, LCV

Data curation: LCG, LCV, LCP

Formal Analysis: LCG, LCV

Funding acquisition: LCG

Investigation: LCG, LCP,LCV

Methodology: LCG, LCP,LCV

Project administration: LCG, LCP, LCV

Resources: LCG, LCV

Software: LCV,LECG

Supervision: LCP, LCV

Validation: LCG, LCV, LCP

Visualization: LCG, LCP, LCV

Writing – original draft: LCG, LCV, LCP

Writing – review & editing: LCG, LCP, LCV

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul-Rahman, N., Jol, C.J., Linus, A.A., Wan-Borhan, W.W.S., Abdul-Jalal, N.S., Baharudin, N., Samsul, S.N.A., Mutalip, N.A., Jitai, A.A., & Hamid, D.F.A.A.A. (2023). Continuous electrocoagulation treatment system for partial desalination of tropical brackish peat water in Sarawak coastal peatlands. *Science of the Total Environment*, 880, 163517.
- Ahangarnokolaei, M. A., Attarian, P., Ayati, B., Ganjidoust, H., & Rizzo, L. (2021). Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 106251.
- Alizadeh, M., Ghahramani, E., Zarrabi, M., & Hashemi, S. (2015). Efficient de-colorization of methylene blue by electro-coagulation method: Comparison of iron and aluminum electrode. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 34, 39–47.

- Ambaye, T. G., & Hagos, K. (2020). Photocatalytic and biological oxidation treatment of real textile wastewater. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5, Article 28.
- Aquino, T. (2017). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil artesanal por fotocatalisis homogénea y heterogénea [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Asfaha, Y.G., Tekile, A., & Zewge, F. (2022). Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100261.
- Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S., & Ersöz, G. (2019). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 47–54.
- Bilińska, L., Blus, K., Gmurek, M., & Ledakowicz, S. (2019). Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. *Chemical Engineering Journal*, 358, 992–1001.
- Bulca, Ö., Palas, B., Atalay, S., & Ersöz, G. (2021). Performance investigation of the hybrid methods of adsorption or catalytic wet air oxidation subsequent to electrocoagulation in treatment of real textile wastewater and kinetic modelling. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101821.
- Fluence Corp Ltd. (2018). Award acknowledges Fluence's excellence in innovation and growth. *Membrane Technology*, 2018, 4.
- Ganesh, R., Boardman, G. D., & Michelsen, D. (1994). Fate of azo dyes in sludges. *Water Research*, 28, 1367–1376.
- GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2020). Efficient treatment for textile wastewater through sequential electrocoagulation, electrochemical oxidation and adsorption processes: Optimization and toxicity assessment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 878, 114578.
- Gümüş, D., & Akbal, F. (2011). Photocatalytic degradation of textile dye and wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 216, 117–124.
- Kalia, S., Dalvi, V., Nair, V. K., Samuchiwal, S., & Malik, A. (2023). Hybrid electrocoagulation and laccase mediated treatment for efficient decolorization of effluent generated from textile industries. *Environmental Research*, 228, 115868.
- Ledakowicz, S., Solecka, M., & Zylla, R. (2001). Biodegradation, decolourisation, and detoxification of textile wastewater enhanced by advanced oxidation processes. *Journal of Biotechnology*, 89, 175–184.
- López, V.G., & Crespi, M.R. (2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, *Cuaderno Tecnológico*, 18: 1–33. <http://hdl.handle.net/2117/87574>
- Minero, C. (1995). A rigorous kinetic approach to model primary oxidative steps of photocatalytic degradations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 38, 421–430.
- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13, 169–189.
- Ribeiro, M.C.M., Starling, M.C.V.M., Leão, M.M.D., & de Amorim, C.C. (2017). Textile wastewater reuse after additional treatment by Fenton's reagent. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 6165–6175.
- Rodríguez, M., Sarria, V., Esplugas, S., & Pulgarin, C. (2002). Photo-fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: Biodegradability of the photo-treated solution. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 151, 129–135.
- Shams, M., Balouchi, H., Alidadi, H., Asadi, F., Goharshadi, E. K., Rezaia, S., Rtimi, S., Anastopoulos, I., Bonyadi, Z., Mehrazamir, K., & Giannakoudakis, D. A. (2021). Coupling electrocoagulation and solar photocatalysis for electro- and photo-catalytic removal of carmoisine by Ag/graphitic carbon nitride: Optimization by process modeling and kinetic studies. *Journal of Molecular Liquids*, 340, 116917.
- Suárez-Escobar, A., Pataquiva-Mateus, A., & López-Vasquez, A. (2016). Electrocoagulation - Photocatalytic process for the treatment of lithographic wastewater. Optimization using response surface methodology (RSM) and kinetic study. *Catalysis Today*, 266, 120–125.
- Tezcan, U.U., & Aytac, E. (2013). Electrocoagulation in a packed bed reactor-complete treatment of color and cod from real textile wastewater. *Journal of Environmental Management*, 123, 113–119.

- Torres, N. H., Souza, B. S., Ferreira, L. F. R., Lima, Á. S., dos Santos, G. N., & Cavalcanti, E.B. (2019). Real textile effluents treatment using coagulation/flocculation followed by electrochemical oxidation process and ecotoxicological assessment. *Chemosphere*, 236, 124309.
- Wang, Y. (2000). Solar photocatalytic degradation of eight commercial dyes in TiO₂ suspension. *Chinese Journal of Catalysis*, 21, 327–331.
- Weber, E.J., & Adams, R. L. (1995). Chemical- and Sediment-Mediated Reduction of the Azo Dye Disperse Blue 79. *Environmental Science and Technology*, 29, 1163–1170.
- Zazou, H., Afanga, H., Akhouairi, S., Ouchtak, H., Addi, A. A., Akbour, R. A., Assabbane, A., Douch, J., Elmchaouri, A., Duplay, J., Jada, A., & Hamdani, M. (2019). Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 214–221.
- Zhang, F., Zhao, J., Shen, T., Hidaka, H., Pelizzetti, E., & Serpone, N. (1998). TiO₂-assisted photodegradation of dye pollutants II. Adsorption and degradation kinetics of eosin in TiO₂ dispersions under visible light irradiation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 15, 147–156.

Received October 10, 2024.

Accepted December 13, 2024.