

## DEGRADACIÓN DE COLORANTES EN SOLUCIONES ACUOSAS UTILIZANDO PLASMA JET ATMOSFÉRICO

INVESTIGACIÓN

### DEGRADATION OF DYES IN AQUEOUS SOLUTIONS USING ATMOSPHERIC PLASMA JET

ROMERO ZÚÑIGA, Gabriela Yolotzin<sup>1</sup>NEIRA VELÁZQUEZ, María  
Guadalupe<sup>1</sup>SORIA ARGÜELLO, Gustavo<sup>1</sup>DE LA PEÑA AGUIRRE, Daniel<sup>2</sup>CANO SALAZAR, Lucía Fabiola<sup>2</sup>

### RESUMEN

Se investigó la capacidad de un plasma jet atmosférico, alimentado con aire, para degradar cinco colorantes orgánicos en soluciones acuosas. El estudio se realizó siguiendo un diseño experimental de laboratorio con réplicas por triplicado, evaluando la degradación visualmente y mediante espectrofotometría UV-Vis. Los resultados demuestran que la eficiencia de degradación está relacionada con la estructura química de los colorantes. A partir de concentraciones iniciales del orden de 5 a 10 mg/L, el verde malaquita, con una concentración inicial de 3.74 mg/L, experimentó la mayor remoción (88%), seguido por el rojo congo, con 9.92 mg/L, que tuvo una remoción del (75%) y el naranja de metilo, con 7.61 mg/L, que alcanzó una remoción del (72%). El rojo de metilo, con 5.48 mg/L, mostró una respuesta moderada (37%), mientras que el azul de metileno, con 6.38 mg/L, fue altamente resistente, con una degradación mínima de solo el 1%. El uso de aire como gas de proceso es una ventaja significativa, ya que elimina los costos asociados a gases nobles y genera simultáneamente especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS/RNS) que actúan como agentes oxidantes. Los resultados concuerdan con la literatura existente, validando el desempeño del reactor y sugiriendo que el plasma jet es una tecnología viable para el tratamiento de efluentes industriales, especialmente en las industrias textil y de curtidurías. Se realizarán estudios futuros para cuantificar la posible fotodegradación y caracterizar los subproductos.

**Palabras clave:** plasma jet atmosférico; degradación de colorantes; tratamiento de agua; contaminación con colorantes; industria textil.

1. Centro de Investigación en Química Aplicada, SECIHTI, Saltillo, Coahuila, México.
2. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia  
gustavo.soria@ciqa.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-9771-8638>

Fecha de recepción  
18 de septiembre de 2025.  
Fecha de aceptación  
28 de noviembre de 2025.

## ABSTRACT

The ability of an atmospheric plasma jet, fed with air, to degrade five organic dyes in aqueous solutions was investigated. The study was conducted using a laboratory experimental design with triplicate replicates, evaluating degradation visually and by UV-Vis spectrophotometry. The results demonstrate that the degradation of efficiency is related to the chemical structure of the dyes. From initial concentrations ranging from 5 to 10 mg/L, malachite green, with an initial concentration of 3.74 mg/L, showed the highest removal (88%), followed by congo red, at 9.92 mg/L, which achieved a removal of 75% and methyl orange, at 7.61 mg/L, which reached a removal of 72%. Methyl red, at 5.48 mg/L, showed a moderate response (37%), while methylene blue, at 6.38 mg/L, was highly resistant, with a minimal degradation of only 1%. The use of air as a process gas is a significant advantage, as it eliminates costs associated with noble gases and simultaneously generates reactive oxygen and nitrogen species (ROS/RNS) that act as oxidizing agents. These findings are consistent with existing literature, validating the reactor's performance and suggesting that the plasma jet is a viable technology for industrial effluent treatment, especially in the textile and tannery industries. Further research will be conducted to quantify potential photodegradation and characterize by-products.

**Keywords:** atmospheric plasma jet; dye degradation; water treatment; organic contamination; reactive oxygen species.

## I. INTRODUCCIÓN

La proliferación de industrias como la textil, alimentaria y farmacéutica ha provocado la descarga masiva de efluentes cargados con colorantes sintéticos, constituyendo un grave problema de contaminación hídrica a nivel global (Wilayat y col., 2024). Con una producción anual que supera el millón de toneladas y un catálogo de más de 100,000 tintes comerciales, grandes volúmenes de estos compuestos terminan en cuerpos de agua, a menudo sin un tratamiento adecuado (Arora, 2014). La presencia de estos colorantes no solo causa un impacto estético adverso, sino que también degrada la calidad del agua al reducir la penetración de la luz solar, inhibiendo la fotosíntesis y afectando la base de la cadena trófica acuática (Al-Tohamy y col., 2022).



La peligrosidad de estos contaminantes radica en su estructura química. Colorantes de uso extendido como los azoicos (p. ej., rojo congo, naranja de metilo), de trifenilmetano (p. ej., verde malaquita) y de fenotiazina (p. ej., azul de metileno) poseen estructuras aromáticas complejas que les confieren una alta estabilidad química y una marcada resistencia a la degradación biológica, una propiedad conocida como recalcitrancia (Al-Tohamy y col., 2022; Sarkar y col., 2021; Shindhal y col., 2021; Wilayat y col., 2024). Más preocupante aún es su perfil toxicológico; muchos de estos compuestos y sus intermediarios de degradación son tóxicos, mutagénicos e incluso carcinogénicos (Shindhal y col., 2021). De igual modo, el verde malaquita es altamente tóxico para organismos acuáticos y difícilmente biodegradable; bajo fotólisis UV directa apenas sufre decoloración ( $\sim 12\%$  en 1 h), mostrando la necesidad de procesos avanzados para su eliminación (Wilayat y col., 2024). La presencia continua de estos tintes en aguas residuales industriales sin depurar constituye un desafío crítico, ya que pueden acumularse como micro contaminantes en diversos compartimentos (aguas, suelos, sedimentos, biota) y generar riesgos ecotoxicológicos a largo plazo (Tkaczyk y col., 2020).

Los métodos de tratamiento convencionales, como los procesos biológicos o fisicoquímicos (coagulación, adsorción), han demostrado ser en gran medida ineficaces para la eliminación completa de estos colorantes recalcitrantes, a menudo transfiriendo el contaminante de una fase a otra o generando residuos secundarios problemáticos como los lodos (Okoniewska, 2021; Saqib y col., 2024). Como respuesta, se han desarrollado los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs), que se basan en la generación in situ de especies altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), para destruir las moléculas de los contaminantes (Al-Tohamy y col., 2022; Salazar y col., 2024). Sin embargo, los POAs establecidos como la ozonización, el proceso Fenton y la fotocatalisis, si bien son efectivos, presentan sus propias limitaciones, como altos costos operativos, la necesidad de un control estricto del pH, la generación de lodos de hierro o la dificultad para separar los catalizadores (Hu y col., 2018; Salazar y col., 2024).

En este contexto, la tecnología de plasma no térmico (o frío) a presión atmosférica ha surgido como una alternativa innovadora y limpia. El plasma, un gas parcialmente ionizado, al ser generado con aire, se convierte en un medio oxidativo que incluye un amplio espectro de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS/RNS), como  $\bullet\text{OH}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^{\bullet-}$ , además de radiación UV y campos eléctricos, todo ello sin la necesidad de añadir

reactivos químicos adicionales y operando a temperatura y presión ambiente (Giardina y col., 2024; Kumar y col., 2022; Kyere-Yeboah y col., 2023). Los reactores tipo jet de plasma a presión atmosférica (APPJ), ofrecen una configuración práctica y económica, especialmente cuando se utiliza aire como gas de trabajo, para introducir estas especies reactivas en soluciones acuosas y promover la degradación de contaminantes. Adicionalmente, la descarga de plasma puede producir peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y ozono disueltos, así como irradiación UV local, creando un cóctel oxidativo completo que potencialmente supera a cada proceso por separado (Chavan & Patil, 2024; Salazar y col., 2024).

Por ejemplo, Zhou y col. (2021) demostraron mediante pruebas de captura de radicales que, en un reactor de microburbujas de plasma, la generación simultánea de  $\bullet OH$  y  $O_2 \bullet^-$  fue la clave para lograr la degradación rápida de distintos tintes modelo (Zhou y col., 2021). Otros trabajos han documentado la efectividad de plasmas no térmicos en la degradación de colorantes orgánicos en agua. Porjai y col. (2023) emplearon un plasma jet de aire a presión atmosférica para degradar azul de metileno en solución, observando una decoloración sustancial en pocos minutos de tratamiento bajo condiciones óptimas (Porjai y col., 2023). García y col. (2017) reportaron la eliminación efectiva de tintes orgánicos en solución utilizando un plasma jet atmosférico de microondas, logrando la degradación, el estudio mostró que las especies excitadas de argón y el peróxido de hidrógeno generados durante la descarga fueron claves en el proceso de oxidación, obteniendo una mineralización parcial de los contaminantes y la formación de subproductos menos tóxicos (García y col., 2017). Por su parte, Attri y col. (2016) compararon jets de plasma directos vs. indirectos en la degradación de tintes, concluyendo que en ambos casos la oxidación avanzada mediante especies reactivas logra remover los cromóforos, aunque con diferencias en las rutas químicas según el modo de contacto (Attri y col., 2016). A diferencia de la mayoría de AOPs químicos, el plasma no introduce reactivos contaminantes al medio; por ello se le considera una tecnología limpia, donde los únicos insumos son energía eléctrica y un gas (nitrógeno, oxígeno, argón u otros). A pesar de los avances, la investigación en este campo presenta áreas de oportunidad significativas para continuar con el desarrollo de trabajos que mediante las condiciones adecuadas de generación puedan contribuir en una mayor degradación de los colorantes.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto del tratamiento con el jet de plasma propuesto en la degradación de cinco colorantes orgánicos

estructuralmente distintos, verde malaquita, azul de metileno, rojo congo, rojo de metilo y naranja de metilo en solución acuosa, utilizando un jet de plasma de aire a presión atmosférica. Este estudio busca evaluar la eficiencia de la degradación bajo condiciones de tratamiento estandarizadas, sentando las bases para futuras investigaciones sobre la identificación de subproductos y la evolución de la toxicidad. De esta manera, se pretende ofrecer una evaluación más integral de la viabilidad del plasma no térmico como una tecnología de tratamiento de aguas residuales industriales con tintes.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio evalúa la degradación de colorantes en soluciones acuosas utilizando un sistema de plasma jet atmosférico. El plasma jet atmosférico es un tipo de plasma no térmico que se caracteriza por una diferencia de temperatura entre los electrones y las partículas más pesadas. En este sistema, los electrones alcanzan temperaturas considerablemente superiores a las de las especies neutras e iones, lo que da como resultado una temperatura del gas cercana a la temperatura ambiente (Neira-Velázquez y col., 2024). Durante la operación de plasma jet atmosférico, la interacción de electrones de alta energía con las moléculas del aire ambiente induce la formación de diversas especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, tales como radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), superóxido ( $\text{O}_2\bullet^-$ ), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Estas especies juegan un papel fundamental en los procesos de oxidación avanzada aplicados a la degradación de colorantes orgánicos en soluciones acuosas, donde se ha demostrado que estas especies son capaces de atacar enlaces azo ( $-\text{N}=\text{N}-$ ), anillos aromáticos y grupos cromóforos presentes en los colorantes, provocando la ruptura de la conjugación molecular y, por ende, la pérdida de color visible (Klumpara y col., 2023; Navaneetha Pandiyaraj y col., 2020; Raji y col., 2022).

El experimento consistió en exponer soluciones individuales de cinco colorantes modelo a este tipo de plasma, con el objetivo de evaluar su eficiencia en la remoción del color y la disminución de la concentración. Para ello, se monitoreó la concentración remanente de cada colorante y se calculó el porcentaje de degradación después del tratamiento. Se implementó un diseño experimental de laboratorio completamente al azar, utilizando estos cinco colorantes modelo de distinta naturaleza química y cada experimento se realizó por triplicado. La variable independiente fue la exposición al plasma



jet atmosférico, mientras que las variables de respuesta fueron la concentración remanente de cada colorante y el porcentaje de degradación, calculado a partir de curvas de calibración específicas para cada compuesto.

## 2.1 SOLUCIONES Y REACTIVOS

Para evaluar la eficiencia del tratamiento con plasma jet atmosférico en la degradación de colorantes en solución acuosa, se seleccionaron cinco colorantes modelo de diferentes naturalezas químicas: azul de metileno, rojo de metilo, rojo congo, verde malaquita y naranja de metilo (Figura 1). Cada uno de ellos se obtuvo en presentación de polvo y se prepararon soluciones individuales en agua desionizada. Las concentraciones de trabajo fueron seleccionadas con el objetivo de garantizar que la absorbancia se mantuviera dentro del rango lineal del espectrofotómetro y evitar la sobresaturación de los detectores. Esto permitió una medición adecuada y una cuantificación precisa posterior mediante espectrofotometría UV-Vis.

Las concentraciones iniciales utilizadas en el tratamiento fueron: azul de metileno (10 MG/L), rojo congo (10 MG/L), rojo de metilo (8 MG/L), verde malaquita (5 MG/L) y naranja de metilo (8 MG/L). De cada solución se extrajeron 250 ml, los cuales fueron transferidos a un recipiente de vidrio para su tratamiento. La longitud de onda de máxima absorbancia ( $\lambda_{max}$ ) de cada colorante se determinó mediante espectrofotometría UV-Vis, la Tabla 1 muestra las características de los colorantes utilizados.

**Tabla 1.** Información de los colorantes modelo utilizados.

COLORANTE	$\lambda_{max}$	MARCA COMERCIAL
VERDE MALAQUITA	620	JALMEK
NARANJA DE METILO	464	CTR SCIENTIFIC
AZUL DE METILENO	664	JALMEK
ROJO CONGO	498	CTR SCIENTIFIC
ROJO DE METILO	520	JALMEK

## 2.2 TRATAMIENTO POR PLASMA JET ATMOSFÉRICO

Para el tratamiento se empleó un reactor de plasma jet atmosférico no térmico alimentado con aire a un flujo de 18 lpm y empleando una potencia de 150 W. El tiempo de tratamiento fue de 15 min, las muestras sin tratar (controles sin plasma) se conservaron en oscuridad para descartar fotólisis espontánea de los colorantes.

## 2.3 DETERMINACIÓN ESPECTROFOTOMÉTRICA

La cuantificación se realizó en un espectrofotómetro UV-Vis de doble haz (intervalo 200-800 nm; resolución 1 nm). Se registró el espectro completo antes y después del tratamiento; la longitud de onda de máxima absorbancia ( $\lambda_{max}$ ) se empleó para el seguimiento cinético de cada colorante. Para cada tinte se construyó una curva de calibración (0-10 MG/L, 1 MG/L de incremento) y se ajustó por regresión lineal ( $R^2 > 0.995$  en todos los casos). La concentración residual ( $C_t$ ) se obtuvo sustituyendo la absorbancia corregida por blanco en la ecuación de la recta y el porcentaje de degradación se calculó con ecuación 1:

$$\text{Porcentaje de Degradación} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (\text{EC.1})$$

Donde  $C_0$  es la concentración inicial.

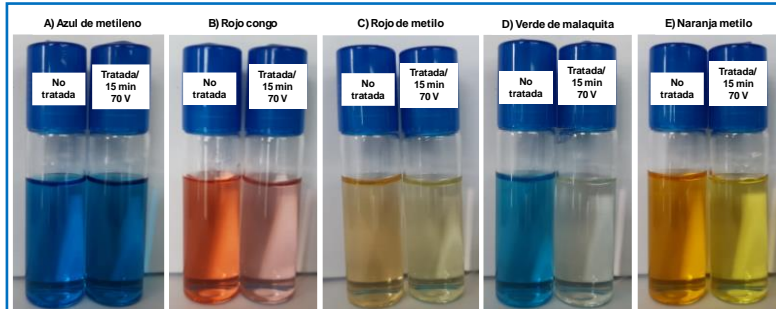
Los experimentos se realizaron por triplicado independiente ( $n=3$ ). Los valores se expresan como media  $\pm$  desviación estándar. Se verificó normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) y se aplicó ANOVA de una vía para comparar concentraciones antes y después del tratamiento con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

## III. RESULTADOS

Al finalizar el tratamiento con el plasma jet atmosférico, las soluciones de colorantes mostraron cambios visuales notables, que se ilustran en la Figura 1, donde se comparan las muestras antes y después de la exposición. De manera general, se observó una disminución perceptible en la intensidad cromática en todas las disoluciones, aunque con variaciones significativas entre los diferentes colorantes.

El verde malaquita experimentó una decoloración casi total, lo que indica una alta eficiencia en su degradación. Por su parte, el rojo congo mostró una disminución intensa de su color, mientras que el rojo de metilo presentó una reducción moderada en su tonalidad. El naranja de metilo también exhibió una disminución apreciable de su color. En contraste, el azul de metileno fue el que menos cambio visible mostró, con una alteración mínima en su

coloración. Estas observaciones visuales son consistentes con los resultados obtenidos de la evaluación espectrofotométrica, que se describen en la siguiente sección.



**Figura 1.** Colorantes no tratados y tratados con plasma jet atmosférico: A) azul de metileno, B) rojo congo, C) rojo de metilo, D) verde malaquita y E) naranja de metilo.

La Figura 1 muestra una comparación visual de la eficiencia de degradación del plasma jet atmosférico sobre los cinco colorantes modelo. Los resultados confirman que el tratamiento logró una variabilidad significativa en la remoción de los colorantes, lo que demuestra una fuerte dependencia de la estructura química.

La cuantificación de la degradación de los colorantes se realizó mediante espectrofotometría UV-Vis para evaluar la eficiencia del plasma jet atmosférico en la remoción del color, siguiendo el método detallado en la sección 2. Los resultados, que presentan los valores de absorbancia y la concentración promedio de los colorantes antes y después del tratamiento, junto con su respectiva desviación estándar (DE), se resumen en la Tabla 2.

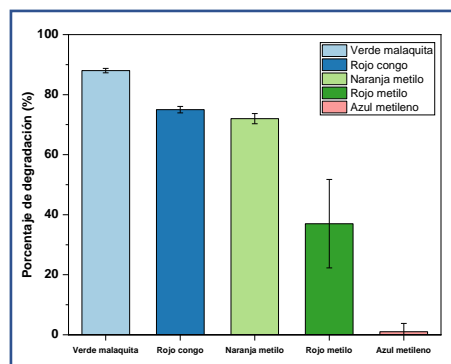
**Tabla 2.** Parámetros de absorbancia y concentración de los colorantes antes y después del tratamiento con plasma.

Colorante y condición	Absorbancia individual			Absorbancia promedio	Absorbancia corregida	Concentración (mg/L)±DE
Verde malaquita (sin tratar)	0.306	0.326	0.324	0.319	0.267	3.744±0.027
Verde malaquita (tratado)	0.047	0.046	0.045	0.046	-0.006	0.439±0.006
Rojo congo (sin tratar)	0.305	0.322	0.307	0.311	0.262	9.922±0.252
Rojo congo (tratado)	0.108	0.111	0.103	0.107	0.058	2.504±0.150
Naranja de metilo (sin tratar)	0.503	0.547	0.531	0.527	0.472	7.606±0.345

Naranja de metilo (tratado)	0.179	0.175	0.178	0.177	0.122	2.125±0.033
Rojo de metilo (sin tratar)	0.059	0.059	0.06	0.059	0.010	5.478±0.244
Rojo de metilo (tratado)	0.055	0.056	0.053	0.055	0.005	3.449±0.655
Azul de metileno (sin tratar)	0.192	0.191	0.21	0.198	0.147	6.384±0.050
Azul de metileno (tratado)	0.197	0.194	0.197	0.196	0.145	6.321±0.040

### 3.1 EFICIENCIA DE DEGRADACIÓN DE LOS COLORANTES CON EL TRATAMIENTO POR PLASMA JET

La Figura 2 muestra una comparación de la eficiencia de degradación expresada en porcentajes de remoción y sus respectivas desviaciones estándar para cada colorante. Los resultados confirman que el tratamiento logró una variabilidad significativa en la remoción de los colorantes, lo que demuestra una fuerte dependencia de la estructura química. El verde malaquita y el rojo congo fueron los colorantes que mostraron la mayor degradación, con porcentajes promedio de 88% y 75%, respectivamente. La concentración inicial de verde malaquita fue de 3.744 mg/L, la cual se redujo drásticamente a 0.439 mg/L, mientras que la de rojo congo disminuyó de 9.922 mg/L a 2.504 mg/L. La baja desviación estándar en ambos casos indica una alta reproducibilidad y precisión del método de degradación. La alta degradación del verde malaquita se atribuye a su esqueleto de trifenilmetano, rico en posiciones alílicas susceptibles a la oxidación por las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS/RNS) generadas en el plasma. Por otro lado, los porcentajes de degradación del rojo congo y naranja de metilo (72%) sugieren que los enlaces azo ( $-N=N-$ ) son atacados de manera eficiente.



**Figura 2.** Porcentaje de degradación de los colorantes con plasma jet atmosférico.

El rojo de metilo mostró una respuesta moderada con una degradación del 37%. La concentración en esta solución se redujo de 5.478 mg/L a 3.449 mg/L. La menor eficiencia podría deberse a la presencia de grupos metoxi que ejercen un efecto estabilizador sobre el cromóforo, lo que dificulta su degradación. Este colorante presentó la mayor desviación estándar en la concentración final (0.655 mg/L), lo que sugiere una mayor variabilidad en la respuesta al tratamiento entre las réplicas.

El azul de metileno resultó ser el colorante más resistente al tratamiento, con una degradación mínima de solo 1%. Su concentración inicial de 6.384 mg/L apenas se vio afectada, finalizando en 6.321 mg/L. La resistencia de este colorante puede atribuirse a su anillo fenotiazínico heteroaromático y su forma catiónica, que promueven la disipación de radicales y la recombinación, lo que lo hace menos vulnerable a la acción oxidativa del plasma en las condiciones de tratamiento utilizadas.

Las altas eficiencias de degradación observadas para el verde malaquita y el rojo congo son relevantes para el tratamiento de efluentes de la industria textil y de curtidurías, donde estos tintes son de uso común. En México, esta problemática es particularmente evidente en cuerpos de agua como el Río Atoyac, donde la descarga de contaminantes industriales afecta de manera significativa la calidad del agua. El uso de aire como gas de proceso para generar el plasma es una ventaja tecnológica, ya que elimina los costos asociados a gases nobles y crea una mezcla sinérgica de ROS/RNS, lo que resulta en un sistema compacto y económicamente viable para el tratamiento in situ de aguas residuales.

A pesar de los resultados prometedores, es importante considerar algunas limitaciones. La posible contribución de la fotodegradación en la remoción del verde malaquita debe ser cuantificada con experimentos control en oscuridad para confirmar el efecto exclusivo del plasma. Además, futuros estudios deberían caracterizar los subproductos de la degradación y determinar la reducción de toxicidad para una evaluación completa del proceso. Para optimizar la degradación de colorantes más recalcitrantes como el azul de metileno, se podrían explorar ajustes en la potencia del plasma, el flujo de gas y el tiempo de residencia y la potencia aplicada. Los resultados de este estudio demuestran que el plasma jet atmosférico representa una tecnología limpia y versátil con el potencial de degradar selectivamente colorantes orgánicos.

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que el plasma jet atmosférico representa una tecnología efectiva para la degradación de colorantes orgánicos en soluciones acuosas. La eficiencia del proceso está directamente correlacionada con la estructura química de los compuestos y los parámetros de operación, confirmando que las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS/RNS) generadas por el plasma actúan como agentes oxidantes selectivos. Se encontró una degradación eficiente para el verde de malaquita y el rojo congo, seguida del naranja de metilo, mientras que el rojo de metilo mostró una respuesta moderada. En contraste, el azul de metileno resultó ser el más resistente al tratamiento. El uso de aire como gas de proceso es una ventaja significativa, lo que lo convierte en una alternativa económica y ambientalmente sostenible.

Este trabajo se alinea directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 de la Agenda 2030, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. La tecnología de plasma jet demuestra ser un proceso limpio y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas, contribuyendo a la meta 6.3 de mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación. Asimismo, la investigación tiene implicaciones positivas para el ODS 12 (Producción y consumo sostenibles), al proponer una solución para la gestión de desechos de la industria textil y de curtidurías.



Esta investigación demuestra la utilidad del proceso para el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas contaminadas con colorantes como las de la industria textil y de curtidurías, aunque se requiere investigación futura para cuantificar la posible fotodegradación y caracterizar los subproductos generados.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la SECIHTI por el apoyo financiero brindado a través del proyecto de Ciencia Básica y de Frontera 2025 (CBF-2025-I-4203), lo que hizo posible la realización de este estudio y al Laboratorio Nacional de Materiales Grafénicos por facilitar el uso de sus instalaciones y equipos. Daniel de la Peña Aguirre agradece a la SECIHTI la beca otorgada para sus estudios de posgrado.

## REFERENCIAS

- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231: 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Arora, S. (2014). Textile dyes: It's impact on environment and its treatment. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 05(03):1000e146. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000e146>
- Attri, P., Yusupov, M., Park, J. H., Lingamdinne, L. P., Koduru, J. R., Shiratani, M., Choi, E. H., & Bogaerts, A. (2016). Mechanism and comparison of needle-type non-thermal direct and indirect atmospheric pressure plasma jets on the degradation of dyes. *Scientific Reports*, 6(1): 34419. <https://doi.org/10.1038/srep34419>
- Chavan, U., & Patil, S. (2024). Water treatment using atmospheric pressure plasma: dielectric barrier discharge and corona discharge method, and reactive species analysis. *E3S Web of Conferences*, 559: 03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455903006>
- García, M. C., Mora, M., Esquivel, D., Foster, J. E., Rodero, A., Jiménez-Sanchidrián, C., & Romero-Salguero, F. J. (2017). Microwave atmospheric pressure plasma jets for wastewater treatment: Degradation of methylene blue as a model dye. *Chemosphere*, 180: 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.126>

- Giardina, A., Lofrano, G., Libralato, G., Siciliano, A., Marotta, E., & Paradisi, C. (2024). Air non-thermal plasma, a green approach for the treatment of contaminated water: the case of sulfamethoxazole. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 5: 1416702. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2024.1416702>
- Hu, Y., Li, Y., He, J., Liu, T., Zhang, K., Huang, X., Kong, L., & Liu, J. (2018). EDTA-Fe(III) Fenton-like oxidation for the degradation of malachite green. *Journal of Environmental Management*, 226: 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.029>
- Klumpara, R., Ngamjarujana, A., & Boonyawan, D. (2023). Study of hydroxyl and nitrite radicals concentration in plasma-activated water by photoluminescence spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2653(1): 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2653/1/012010>
- Kumar, A., Škoro, N., Gernjak, W., Povrenović, D., & Puač, N. (2022). Direct and indirect treatment of organic dye (acid blue 25) solutions by using cold atmospheric plasma jet. *Frontiers in Physics*, 10: 835635. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.835635>
- Kyere-Yeboah, K., Bique, I. K., & Qiao, X. (2023). Advances of non-thermal plasma discharge technology in degrading recalcitrant wastewater pollutants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 320: 138061. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138061>
- Navaneetha Pandiyaraj, K., Vasu, d., Padmanabhan, P. V. A., Pichumani, M., Deshmukh, R. R., & Kandavelu, V. (2020). Evaluation of influence of cold atmospheric pressure argon plasma operating parameters on degradation of aqueous solution of Reactive Blue 198 (RB-198). *Plasma Science and Technology*, 22(5): 055504. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ab568d>
- Neira-Velázquez, M. G., Ku-Herrera, J. de J., Narro-Céspedes, R. I., Flores-Villaseñor, S. E., Cortez-Garza, Y. L., Cuellar-Gaona, C. G., & Soria-Arguello, G. (2024). Carbon nanostructures synthesis by catalyst-free atmospheric pressure plasma jet. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 57(31): 315302. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad44a6>
- Okoniewska, E. (2021). Removal of selected dyes on activated carbons. *Sustainability*, 13(8): 4300. <https://doi.org/10.3390/su13084300>
- Porjai, P., Wattanawikkam, C., Bootchanont, A., Barnthip, N., Pavasupree, S., Jitjing, P., Boonyawan, D., & Kachayut, K. (2023). Discharge duty cycles effects of 20 kHz air atmospheric pressure plasma jet on methylene blue solution degradation. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 30(2): 239. <https://doi.org/10.55766/sujst-2023-02-e01585>
- Raji, A., Vasu, D., Navaneetha Pandiyaraj, K., Ghobeira, R., & Deshmukh, R. R. (2022). Degradation and detoxification of remazol blue contaminants as a model textile effluent via advanced nonthermal plasma oxidation processes. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50(6): 1407–1415. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3147544>



- Salazar, L. F. C., Delgado, V. J. C., Guía, T. E. F., & Argüello, G. S. (2024). Removal of dyes from water: Techniques and materials. *Sustainable Agriculture and Global Environmental Health* (pp: 93–130). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003504474-5>
- Saqib, S., Muneer, A., Munir, R., Sayed, M., Waqas, M., Aliyam, T., Younas, F., Farah, M. A., Elsadek, M. F., & Noreen, S. (2024). Green hybrid coagulants for water treatment: An innovative approach using alum and bentonite clay combined with eco-friendly plant materials for batch and column adsorption. *Environmental Research*, 259: 119569. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119569>
- Sarkar, S., Echeverría-Vega, A., Banerjee, A., & Bandopadhyay, R. (2021). Decolourisation and biodegradation of textile di-azo dye congo red by *Chryseobacterium geocarposphaerae* DD3. *Sustainability*, 13(19): 10850. <https://doi.org/10.3390/su131910850>
- Shindhal, T., Rakholiya, P., Varjani, S., Pandey, A., Ngo, H. H., Guo, W., Ng, H. Y., & Taherzadeh, M. J. (2021). A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater. *Bioengineered*, 12(1): 70–87. <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1863034>
- Tkaczyk, A., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2020). Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of The Total Environment*, 717: 137222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>
- Wilayat, S., Fazil, P., Khan, J. A., Zada, A., Ali Shah, M. I., Al-Anazi, A., Shah, N. S., Han, C., & Ateeq, M. (2024). Degradation of malachite green by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> processes: kinetics and mechanism. *Frontiers in Chemistry*, 12: 1467438. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1467438>
- Zhou, R., Zhang, T., Zhou, R., Mai-Prochnow, A., Ponraj, S. B., Fang, Z., Masood, H., Kananagh, J., McClure, D., Alam, D., Ostrikov, K. (Ken), & Cullen, P. J. (2021). Underwater microplasma bubbles for efficient and simultaneous degradation of mixed dye pollutants. *Science of The Total Environment*, 750: 142295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142295>