



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,
Volumen 10, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1

SOLUCIONES DE AZUL DE METILENO TRATADAS CON PLASMA JET DE AIRE: UN PASO HACIA UNA ALTERNATIVA DE REMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

**AIR JET PLASMA-TREATED METHYLENE BLUE
SOLUTIONS: A STEP TOWARDS A WASTEWATER
REMEDICATION ALTERNATIVE**

Francisco Javier Alonso-Montemayor

Centro de Investigación en Química Aplicada – México

Luis Felipe Martínez-Hernández

Universidad Autónoma de Coahuila – México

Gabriela Adriana Bastida

Universidad de Girona – España

María Guadalupe Neira-Velázquez

Centro de Investigación en Química Aplicada – México

Gustavo Soria-Argüello

Centro de Investigación en Química Aplicada - México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1.23228

Soluciones de Azul de Metileno tratadas con Plasma Jet de Aire: Un Paso hacia una Alternativa de Remediación de Aguas Residuales

Francisco Javier Alonso-Montemayor¹francisco.alonso.ps@ciqa.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-0612-9150>Centro de Investigación en Química Aplicada,
México**Luis Felipe Martínez-Hernández**martinezfelipe@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0009-0002-4921-5996>

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Gabriela Adriana Bastidagabriela.bastida@udg.edu<https://orcid.org/0000-0003-0205-1787>LEPAMAP-PRODIS, Universidad de Girona,
España**María Guadalupe Neira-Velázquez**guadalupe.neira@ciqa.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-3850-850X>Centro de Investigación en Química Aplicada,
México**Gustavo Soria-Argüello**gustavo.soria@ciqa.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-9771-8638>Centro de Investigación en Química Aplicada,
México

RESUMEN

Este estudio investiga el comportamiento de concentración de las soluciones de azul de metileno (MB) y parámetros específicos de calidad del agua antes y después del tratamiento con plasma de aire a presión atmosférica, con el fin de evaluar cómo los efectos físicos y químicos inducidos por el plasma influyen en la degradación de MB. El análisis espectrofotométrico, realizado en soluciones de MB de 0 a 13 mg L⁻¹, permitió establecer una correlación lineal (R^2) entre la densidad óptica (OD) con la concentración ($R^2 \geq 0.95$). Al mismo tiempo, se midieron el potencial de hidrógeno (pH), el potencial de oxidación-reducción (ORP), la conductividad eléctrica (EC) y los sólidos disueltos totales (TDS) para evaluar el impacto de la adición de MB al agua desionizada y la exposición al plasma. La curva de calibración presentó una pequeña desviación de 3.9%, atribuida a la variabilidad en la preparación. El análisis espectrofotométrico indicó una tasa de degradación de MB de aproximadamente 25%, asociada con la generación de especies reactivas que acidificaron las soluciones y así como con posibles efectos físicos como la cavitación.

Palabras clave: azul de metileno, especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, proceso de oxidación avanzado, degradación de colorante, plasma jet a presión atmosférica

¹ Autor principal

Correspondencia: gustavo.soria@ciqa.edu.mx

Air Jet Plasma-Treated Methylene Blue Solutions: A Step towards a Wastewater Remediation Alternative

ABSTRACT

This study investigates the concentration behavior of methylene blue (MB) solutions and specific water quality parameters before and after atmospheric pressure air plasma treatment to evaluate how plasma-induced physical and chemical effects influence MB degradation. Spectrophotometric analysis, of 0 to 13 mg L⁻¹ MB solutions, allowed us to establish a correlation between optical density (OD) to concentration ($R^2 \geq 0.95$). At the same time, hydrogen potential (pH), oxidation-reduction potential (ORP), electrical conductivity (EC), and total dissolved solids (TDS) were measured to assess the impact of MB addition to deionized water and plasma exposure. The calibration curve exhibited a deviation of ~3.9% from expected MB concentrations, attributed to preparation variability. Spectrophotometric analysis indicated an MB degradation rate of approximately 25%, associated with the generation of reactive and energetic species that acidified the solutions and with possible physical effects such as cavitation.

Keywords: advanced oxidation process, atmospheric pressure plasma jet, dye degradation, methylene blue, reactive oxygen and nitrogen species

*Artículo recibido 12 enero 2025
Aceptado para publicación: 16 febrero 2026*



INTRODUCCIÓN

Las industrias textiles consumen grandes cantidades de agua y reactivos para el procesamiento húmedo, y los insumos de reactivos que no se incorporan a los tejidos se convierten en residuos y alteran la ecología acuática (Ali et al., 2009). Los efluentes textiles se descargan en su mayoría, tras un pretratamiento mínimo o inexistente, en corrientes, estuarios y otros cuerpos de agua, convirtiéndose en una amenaza para la salud y el medio ambiente (Silva et al., 2019). Este problema es especialmente grave en países en vías de desarrollo ya que carecen de sistemas adecuados de tratamiento de agua (Farfán et al., 2022). Desde la última década, se considera que el contenido de colorantes en las aguas residuales textiles oscila entre 10 y 200 mg L⁻¹. Por lo tanto, es necesario mitigar la presencia de colorantes en las aguas residuales antes de que sean descargadas en los cuerpos de agua (Silva et al., 2019) para asegurar un suministro de agua de buena calidad conforme a los límites permisibles establecidos por el gobierno (Secretaría de Salud, 1994) e índices de calidad adecuados internacionalmente reconocidos (Gil-Mora et al., 2022).

El azul de metileno (MB) es un colorante básico que se utiliza ampliamente para el teñido textil de algodón y lana ya que sus moléculas poseen estructuras aromáticas que las hacen relativamente estables y no biodegradables. Este colorante suele descargarse de manera común y arbitraria en los cuerpos de agua, intoxicando a los organismos acuáticos y afectando la transparencia del agua. En consecuencia, se han propuesto diversas técnicas de descomposición química del MB, tales como la fotocatalisis, la reacción de Fenton, la oxidación avanzada y la adsorción mediante materiales porosos, entre otras técnicas. Sin embargo, los métodos clásicos presentan problemas de disposición, ya que generan grandes cantidades de lodos y requieren cantidades importantes de reactivos ó catalizadores (Abdel-Fattah et al., 2019; Silva et al., 2019).

El plasma jet a presión atmosférica es una tecnología de procesos de oxidación avanzada que ha recibido una atención creciente, ya que genera plumas de plasma conformadas por electrones de alta energía (e^-), fotones ultravioletas (γ^{UV}), iones, radicales y otras especies reactivas que pueden emplearse para modificar superficies de materiales o líquidos implicados en aplicaciones ambientales, biomédicas y de procesamiento, como el tratamiento de aguas residuales (Aloui et al., 2024). La composición del gas de descarga determina las partículas presentes en la pluma del plasma, como las especies reactivas de

oxígeno y nitrógeno (RONS) en el caso del aire. Asimismo, la concentración e intensidad de las especies reactivas y energéticas dependen del caudal de gas y del voltaje de descarga, respectivamente (Abdel-Fattah et al., 2019).

Se ha reportado que los tratamientos con plasma jet de Ar suelen ser los más eficaces para degradar MB a nivel de laboratorio, alcanzando los mayores porcentajes de degradación ($D \gg 90\%$) para soluciones acuosas de MB de 5 a 250 mg L⁻¹ y volúmenes de 0.002 a 0.1 L tratadas durante 10 a 50 min (Attri et al., 2016; Chandana et al., 2015; Kuwahata et al., 2010; Kuwahata et al., 2018; Silva et al., 2019; Tang et al., 2025; Vo et al., 2025). En los tratamientos con plasma de Ar, la ubicación del electrodo influye en la cantidad de RONS producidas (Attri et al., 2016); la cinética de degradación del MB disminuye con el aumento de la concentración de azul de metileno, simbolizada como [MB], pero se mantiene superior a la de otros plasmas, como los de He (que producen especies metastables de O), aire y N₂ (Chandana et al., 2015; García et al., 2017; Jaiswal & Aguirre, 2021; Kuwahata et al., 2018); las especies reactivas de oxígeno, como •OH y oxígeno singlete, desempeñan un papel importante en la degradación del MB (Jaiswal & Aguirre, 2021; Quin et al., 2023; Silva et al., 2019); las distancias cortas entre la boquilla del jet y la superficie del agua favorecen la degradación del MB (Hamdan et al., 2020); y la adición de O₂ e inmersión de la pluma del plasma mejoran los requerimientos energéticos de la degradación del MB (Kasih et al., 2017; Nishiyama et al., 2018; Stancu et al., 2011). Resultados similares se han reportado para soluciones acuosas de MB de 35 a 100 mg L⁻¹ y volumen de 0.03 L tratadas con plasma jet de He durante 40 a 45 min, alcanzando $D \approx 99\%$, y mostrando que la degradación del MB depende fuertemente del tiempo de tratamiento, del flujo de He y de la longitud de la pluma del plasma (Abdel-Fattah et al., 2019), de altos voltajes (Gott et al., 2021). Además, se ha encontrado que las especies reactivas producidas por el plasma se localizan inicialmente en la superficie de la solución, y que se requieren varios minutos para la difusión completa de dichas especies reactivas (Invernizzi et al., 2020). A pesar de que los tratamientos con plasma jet de Ar, He y O₂ son más eficaces para degradar MB en soluciones acuosas que los plasmas de aire o N₂, con algunas excepciones (Diamond et al., 2019; Li et al., 2017), el incremento en el costo de adquisición de gases nobles y de la producción de O₂ podría obstaculizar la escalabilidad tecnológica del tratamiento por plasma.



La presencia de RONS producidas por el plasma, como el ácido nítrico (HNO_3) y el ácido nitroso (HNO_2), se ha asociado con la degradación del MB (Takemura et al., 2013). Se han reportado algunos esfuerzos para compensar la menor eficacia del tratamiento con plasma de aire para degradar MB en soluciones acuosas, como la pulsación de la pluma plasma, encontrándose que la mayor eficiencia de descomposición se presenta en los primeros tiempos de tratamiento (Foster et al., 2013). Se ha explicado que la densidad electrónica en modo pulsado (10^{14} – 10^{15} cm^{-3}) es mayor que en modo continuo ($\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$), produciendo así más especies activas mediante colisiones de e^- con partículas neutras (Jiacun et al., 2020). No obstante, para otros tratamientos por plasma, la exposición continua a la pluma de plasma sigue siendo más eficiente (Li et al., 2017). Otro enfoque consiste en realizar tratamientos con plasma de aire con altos ciclos de trabajo de descarga ($>50\%$ a 80%), que es una medida de la potencia media de salida por pulso de plasma, para los cuales se ha reportado $D \approx 100\%$ en soluciones acuosas de MB de 10 mg L^{-1} y volumen de 0.05 L (Wattanawikkam et al., 2023). En resumen, puede lograrse una tasa de degradación relativamente alta del MB mediante el tratamiento con plasma de aire, aunque esto se ha reportado para soluciones de MB con concentraciones bajas ($<10 \text{ mg L}^{-1}$) y volúmenes pequeños ($<0.1 \text{ L}$). En consecuencia, es necesario estudiar la degradación del MB en soluciones acuosas de mayor volumen y mayor [MB] usando tratamientos con plasma jet de aire. El objetivo de este trabajo fue estudiar la capacidad del plasma jet de aire para degradar MB trihidratado presente en alta concentración ($\geq 10 \text{ mg L}^{-1}$) y en un gran volumen (0.25 L) de agua desionizada, siendo un modelo de aguas residuales.

METODOLOGÍA

Materiales y procedimiento para la preparación de las soluciones

El colorante en polvo de azul de metileno (MB) utilizado en este estudio fue adquirido de Jalmek (cat. N.º A8500), que con una pureza $> 82\%$, fórmula $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, CAS 7220-79-3, masa molar de $373.91 \text{ g mol}^{-1}$, punto de fusión de 105 – 110°C y longitud de onda máxima de absorción UV-vis en agua $\lambda_{\text{MB}} = 663$ – 637 nm . El agua desionizada utilizada para preparar las diluciones del colorante se obtuvo inicialmente a partir de un pozo de agua local (Saltillo, México, $25^\circ 26' 00'' \text{ N}$; $101^\circ 00' 00'' \text{ O}$), la cual fue procesada en una caldera CM 3010 Myrsgo (número de serie CM 15 1224, presión de diseño 10.54 kg cm^{-2} , presión máxima 9.49 kg cm^{-2} , superficie 9 m^2 y potencia de 10 caballos de fuerza) para obtener agua destilada, que posteriormente fue tratada en un desionizador de agua Milli-Q Advantage



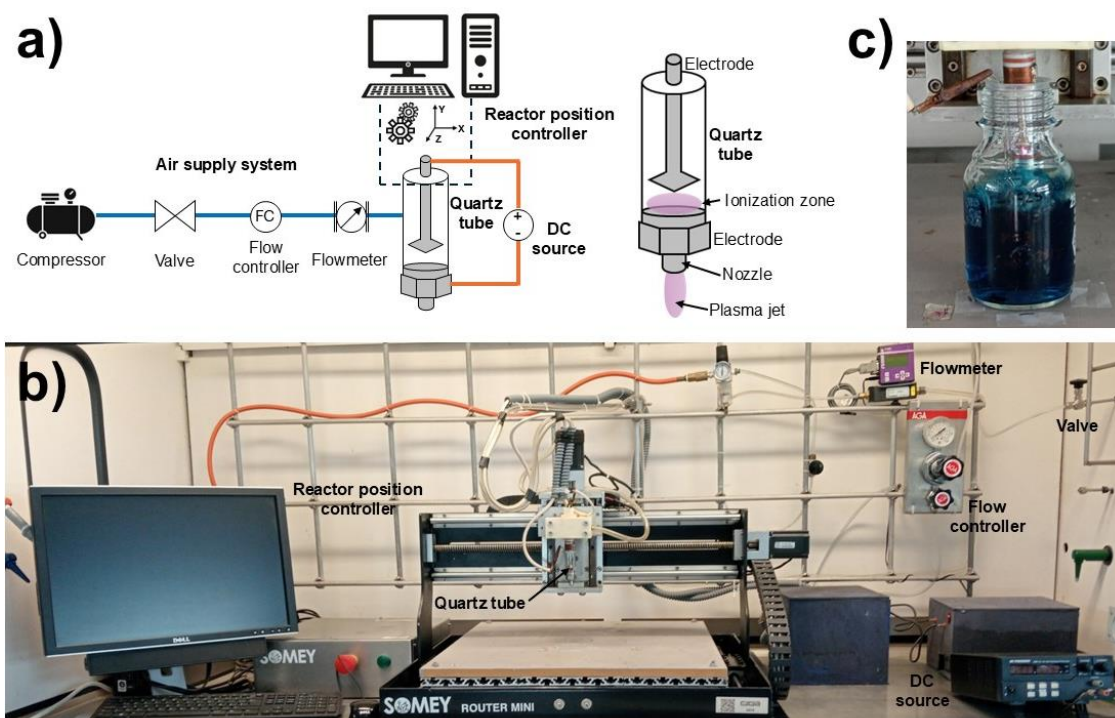
con un monitor de TOC A10 Q-POD® (agua a 27.4 °C, 18.2 MΩ·cm y 3 ppb de TOC; capacidad máxima de 3.5 L).

Se utilizaron agua desionizada y polvo de MB para obtener muestras de soluciones de MB de 0.25 L ($n = 6$) con una concentración de 13 mg L⁻¹. Este fue el nivel mínimo de [MB] confiable, aceptable y medible identificado mediante el análisis de una curva de calibración ($n = 3$) con una $R^2 > 0.995$. Dicha curva de calibración se preparó a partir de diluciones de MB de 0 a 13 mg L⁻¹ (inicialmente se analizaron soluciones de hasta 15 mg L⁻¹ de MB para detectar la pérdida de linealidad), con incrementos constantes de 1 mg L⁻¹, las cuales se obtuvieron también a partir de una solución de MB de 20 mg L⁻¹ y 1.5 L de volumen. Cada matraz de muestra se cubrió con papel aluminio para minimizar la posible fotólisis mediada por la luz ambiental. Posteriormente, las diluciones de MB de 13 mg L⁻¹ se sometieron a análisis UV-vis y de parámetros de calidad, antes y después del tratamiento por plasma.

Equipo de tratamiento mediante plasma

Se utilizó un reactor de plasma jet no térmico a presión atmosférica (véase la Figura 1), alimentado con un flujo de aire de 29.2 ± 0.24 L min⁻¹ ($n = 12$) que fue suministrado por un compresor Kaser Airtower 2.5C Sigma conectado al equipo de plasma. El reactor fue operando con una potencia eléctrica de 75.5 ± 0.5 V ($n = 12$) y 2.3 ± 0.1 A ($n = 12$) proporcionada por una fuente de alimentación de alta tensión de corriente alterna, para tratar las muestras de solución de colorante. Durante el tratamiento, la distancia entre la boquilla y la base del equipo fue de ~7 cm. La boquilla se centró sobre el matraz de la muestra mediante un controlador CNC ArtSoft Mach 2.0 para Windows XP y 2000, y se sumergió aproximadamente ~1 cm por debajo de la superficie del líquido. Cada muestra fue tratada con plasma de aire a presión atmosférica durante 60 min. La boquilla del reactor penetró aproximadamente ~1 cm por debajo de la superficie de la muestra para favorecer la difusión de las RONS producidas por el plasma en las soluciones de colorante. Posteriormente, 30 min después del tratamiento por plasma, cuando el color de la solución se consideró estable, cada muestra se sometió a análisis UV-vis y de parámetros de calidad a la misma temperatura (~21 °C).

Figura 1. a) Esquematación básica del equipo de plasma jet, b) fotografía del equipo y c) un modelo de aguas residuales contaminadas con colorante expuesto de plasma jet de aire.



Espectrofotómetro UV-vis y equipo para evaluar los parámetros de calidad del agua

Se utilizó un espectrofotómetro de microplacas Agilent BioTek Epoch 2, equipado con una fuente de luz tipo *flash* de xenón, detector de fotodiodo, rango de longitudes de onda de 200 a 999 nm con incrementos de 1 nm, ancho de banda del monocromador de 2.9 nm y una resolución de densidad óptica (OD) de 0.001, operado con el software Gen5 3.11, para medir los valores de OD de las soluciones de colorante. Las alícuotas se recolectaron de las muestras mediante pipetas Pasteur desechables de vidrio borosilicato Kimble® de 9", y se vertieron en cubetas desechables Brand® de 1.5 mL. Para evaluar el potencial de hidrógeno (pH), el potencial de óxido-reducción (ORP), la conductividad eléctrica (EC) y los sólidos disueltos totales (TDS) de las muestras de colorante, antes y después del tratamiento por plasma, se utilizó un medidor multifunción de calidad del agua (modelo EZ-9910) (ATC: 0 a 60 °C, precisión ± 0.5 °C y resolución de 1 °C).

Análisis de la densidad óptica y evaluación de los parámetros de calidad del agua

Las alícuotas de soluciones de MB de 0 a 13 mg L⁻¹, con incrementos constantes de 1 mg L⁻¹ (n = 3), se analizaron a $\lambda_{MB} = 663$ nm para obtener una curva de calibración ajustada a $R^2 \geq 0.995$. El modelo lineal de la curva de calibración utilizado para obtener $OD = f([MB])$ se expresa en la Ec. (1), donde la

OD de cada solución de colorante se corrigió restándole la OD del alícuota blanco (agua desionizada). El porcentaje de degradación (D) se estimó mediante la Ec. (2), donde C_0 es el valor medio de MB del conjunto de muestras ($n = 6$) sin tratamiento por plasma, mientras que $C_{r,60}$ es la [MB] de la muestra r tratada con plasma. El análisis por espectrofotometría UV-vis se complementó con la evaluación del pH, ORP, EC y TDS de las muestras de MB de 13 mg L^{-1} , con el fin de apoyar la interpretación de los resultados.

$$\text{OD} = (0.1953 \text{ L mg}^{-1}) \times [\text{MB}] + 0.0565; R^2 = 0.9967 \quad (1)$$

$$D = (1 - C_{r,60}C_0^{-1}) \times 100 \quad (2)$$

Análisis estadístico

Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores programado en Excel, apoyado con la técnica de diferencia mínima significativa (LSD) para la comparación de medias ($n = 6$), con el fin de evaluar la significancia estadística ($\alpha < 0.05$) de la influencia del tiempo de tratamiento por plasma y de la [MB] inicial sobre la [MB] final y parámetros de calidad del agua evaluados y cuyos valores fueron optimizados mediante la transformación de Yeo-Johnson. Los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de errores del ANOVA se corroboraron mediante las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y de varianza constante de Cochran, programadas en Excel. El modelo de la curva de calibración se validó considerando los detalles técnicos de absorbancia del equipo (rango dinámico de 0–4 OD para cubeta, exactitud $< 1 \%$ para 2 OD y $< 3 \%$ para 2.5 OD, linealidad $< 1 \%$ para 0–2 OD y repetibilidad $< 0.5 \%$ a 2 OD) y utilizando un ANOVA de un factor programado en Excel ($n = 3$), similar al ya mencionado. El número fijo de réplicas (n) se estimó para obtener un grado de libertad del error $gl_{\text{Error}} \geq 20$, utilizando la Ec. (3), con el fin de favorecer la estabilidad de la varianza de los residuos, la probabilidad de detectar diferencias reales entre grupos y la robustez de la prueba frente a violaciones de los supuestos del ANOVA (Escalante Vázquez, 2014). Aquí, S es la fuente de variación controlada codificada como $i = 1$ para la [MB] inicial e $i = 2$ para el tiempo de tratamiento por plasma, mientras que a es el número de niveles del respectivo S (por ejemplo, si los niveles de [MB] inicial, $i = 1$, son 0 y 13 mg L^{-1} , entonces $a_1 = 2$). En la misma línea, se utilizó la técnica de transformación de datos de Yeo-Johnson para variables no positivas con el fin de corregir posibles violaciones de los supuestos del ANOVA sin cambiar la proporción original de los datos, ya que la técnica de Box-Cox

no puede aplicarse a variables medidas con $Y = 0$ como muestra la Ec. (4) (Weisberg, 2014; Yeo & Johnson, 2000). Para la aproximación de Yeo-Johnson, los valores originales de Y se transformaron proporcionalmente mediante leyes de potencia adecuadas $T = f(Y, \varphi)$, donde φ es un parámetro de potencia que fuerza que la transformación sea suave para $-2 \leq \varphi \leq 2$. Dado que $Y \geq 0$, T se define de acuerdo con la Ec. (5), donde φ se optimizó estimando el valor que produce el mayor parámetro crítico de Shapiro–Wilk W_{SW} calculado con $T = f(Y, \varphi)$.

$$n = 1 + gl_{\text{Error}} \times \left(\prod_{i=1}^S a_i \right)^{-1} \quad (3)$$

$$T(Y, \varphi) = \begin{cases} \varphi = 0 \therefore \ln(Y) \\ \varphi \neq 0 \therefore \varphi^{-1}(Y^\varphi - 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$T(Y \geq 0, \varphi) = \begin{cases} \varphi = 0 \therefore \ln(Y + 1) \\ \varphi \neq 0 \therefore \varphi^{-1}((Y + 1)^\varphi - 1) \end{cases} \quad (5)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación y validación estadística de la curva de calibración

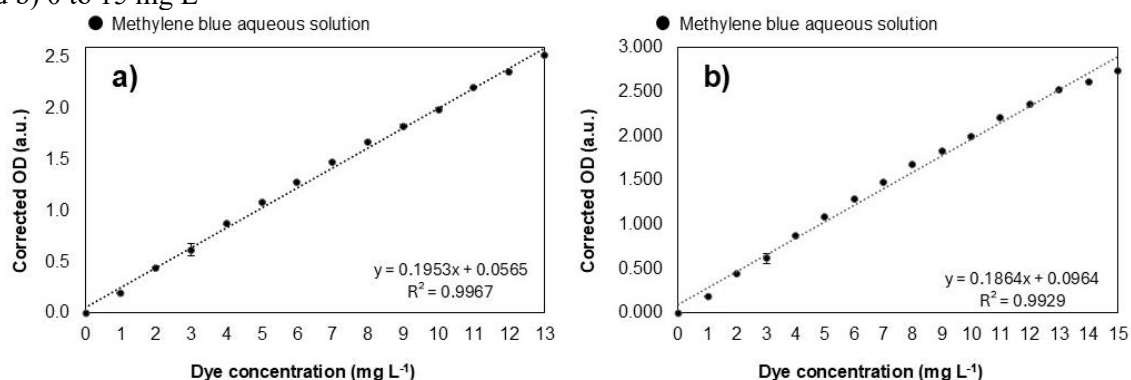
Una vez que se caracterizaron las diluciones de MB de 0.25 L con concentraciones de 0 a 15 mg L⁻¹, los valores de OD se analizaron para determinar la [MB] mínima medible de manera confiable y aceptable. De acuerdo con los detalles técnicos de absorbancia del equipo, se espera que las mediciones de OD presenten una pérdida de linealidad < 1 % para valores de OD < 2. Sin embargo, este comportamiento esperado no se cumplió en todos los casos y, para las diluciones de MB analizadas, se encontró que la linealidad se mantuvo < 1 % al menos para valores de OD < 2.735 ± 0.001. Posteriormente, se aceptaron $R^2 \geq 0.995$ para asegurar una pérdida de linealidad aceptable. La Tabla 1 resume los valores de R^2 entre los valores de OD corregidos y los niveles de [MB]. Se encontró que la mayor similitud de la tendencia de los datos respecto a un modelo lineal se presenta para valores de OD entre 1.481 ± 0.006 y 1.676 ± 0.005 ($R^2 = 0.9990$ para ambos valores de OD), lo que indica que los valores máximos de OD medibles y confiables podrían obtenerse al analizar diluciones de MB entre 7 y 8 mg L⁻¹. No obstante, considerando que una pérdida de linealidad < 1 % es aceptable, los valores de OD obtenidos al analizar diluciones de MB de 13 mg L⁻¹ constituyen las mediciones mínimas y aceptables, ya que su curva de calibración presenta una pérdida de linealidad de 0.3 %. En contraste, las diluciones de MB de 14 y 15 mg L⁻¹ presentan pérdidas de linealidad de 0.5 y 0.7 %, respectivamente.

Estos resultados indican que pueden obtenerse valores aceptables de OD y [MB] al analizar diluciones de MB en el intervalo de 0 a 13 mg L⁻¹. Esto es algo que también se ve reflejado de forma gráfica, como muestra la Figura 2, siendo que la trayectoria de OD con respecto de [MB] permanece visualmente lineal hasta 13 mg L⁻¹ (Figura 1a), mientras que a partir de 14 mg L⁻¹ la curvatura de la trayectoria se acentúa de forma considerable (Figura 1b).

Tabla 1. Densidad óptica corregida (OD) y parámetro de correlación lineal (R^2) del modelo lineal de la curva de calibración correspondiente a las soluciones con [MB] inicial (n = 3).

[MB] (mg L ⁻¹)	OD	R^2	[MB] (mg L ⁻¹)	OD	R^2
2	0.440±0.003	0.9958	9	1.828±0.016	0.9980
3	0.616±0.060	0.9964	10	1.993±0.017	0.9970
4	0.876±0.004	0.9970	11	2.205±0.008	0.9973
5	1.084±0.008	0.9983	12	2.363±0.004	0.9971
6	1.285±0.003	0.9988	13	2.519±0.001	0.9967
7	1.481±0.006	0.9990	14	2.615±0.004	0.9949
8	1.676±0.005	0.9990	15	2.735±0.001	0.9929

Figure 2. Calibration curve of corrected OD as a function of [MB] for dilutions with a) 0 to 13 mg L⁻¹ and b) 0 to 15 mg L⁻¹



De acuerdo con el ANOVA de una vía aplicado a la curva de calibración, puede afirmarse con una confianza $\gg 99\%$ que al menos un valor medio de OD ($\overline{OD}$) es significativamente diferente de otro, ya que el valor de la F de Fisher calculado con un parámetro de potencia óptimo $\varphi = 0.55$ fue $F_{ANOVA} \approx 1.2 \times 10^5 \gg F_{\alpha=0.05} = 2.840$. Además, la prueba LSD reveló, con una confianza $> 99\%$, que cada $\overline{OD}$ es

significativamente diferente de los demás, dado que los valores de $\Delta\overline{OD}$ oscilan entre 0.050 y 1.811, siendo mayor que $LSD_t = 2.787, \alpha = 0.01 = 0.006$. La Tabla A1 resume el conjunto de datos necesario para replicar los resultados del ANOVA de una vía apoyado con LSD y las pruebas de supuestos correspondientes a las soluciones de MB de 0 a 13 mg L⁻¹.

De acuerdo con los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk estimados con $\phi = 0.55$ puede afirmarse con una confianza $\geq 95\%$ que los residuos de la OD siguen una distribución normal, ya que $W_{sw} = 1.0442 > W_{\alpha=0.05} = 0.9469$, lo que indica que la comparación de los datos transformados no es estadísticamente inválida. Además, los resultados de la prueba de varianza constante de Cochran indican con una confianza $\geq 95\%$ que las varianzas de la OD no son significativamente diferentes entre sí, dado que $G_C = 0.1894 < G_{\alpha=0.05} = 0.7518$, lo que indica que la variabilidad de las mediciones de OD fue significativamente similar entre los tratamientos. La prueba gráfica de independencia de errores (Figura A1) muestra que la mayoría de los residuos de OD están ordenados aleatoriamente con respecto al orden de ejecución τ , lo que implica que, en general, las mediciones de OD no estuvieron significativamente influenciadas por el orden de los experimentos. Por lo tanto, el análisis estadístico de la curva de calibración de las soluciones de MB de 0 a 13 mg L⁻¹ validó el uso del modelo lineal descrito en la Ec. (1).

Evaluación de las soluciones selectas antes y después del tratamiento con plasma jet de aire

Una vez que se determinó 13 mg L⁻¹ como la [MB] máxima medible de manera confiable, se preparó un nuevo conjunto de diluciones de 13 mg L⁻¹ ($n = 6$) de acuerdo con el diseño experimental de ANOVA de dos vías. El valor $\overline{OD}$ de las muestras de MB de 13 mg L⁻¹ sin tratar se comparó con el modelo de la curva de calibración de MB de 0 a 13 mg L⁻¹ para corroborar la [MB] inicial. Se encontró que el valor $\overline{OD} = 2.488 \pm 0.014$ de las muestras de MB de 13 mg L⁻¹ sin tratar fue $\sim 1.2\%$ diferente del $\overline{OD} = 2.519 \pm 0.001$ de las alícuotas de calibración de MB de 13 mg L⁻¹, lo que revela que los procedimientos de preparación de las soluciones tuvieron una pequeña influencia en los valores de OD. Por lo tanto, la relativamente pequeña discrepancia ($\sim 3.9\%$) entre la estimación de la media de la [MB] inicial mediada por la curva de calibración (13 mg L⁻¹) y el de las soluciones selectas (12.5 ± 0.1 mg L⁻¹) puede deberse en parte a que los lotes de disolución madre fueron diferentes para la preparación de la curva de calibración y las diluciones selectas.

Por otra parte, se encontró que el tratamiento por plasma evaporó suficiente agua como para dejar la boquilla a nivel de la superficie de la solución después de 30 min y a ~ 2.5 cm después de 60 min, lo que indica una tasa de descenso del nivel de agua de ~ 0.083 cm min⁻¹. Además, se estimó que se evaporaron ~ 108 mL de agua de cada solución de colorante después de 60 min, lo que provocó que la solución de MB tratada con plasma alcanzara un valor OD = 2.959 ± 0.022 , el cual incluso se encuentra fuera del máximo de las soluciones de MB analizadas (15 mg L⁻¹). Se ha reportado (Kooshki et al., 2024) que el incremento en la concentración de especies reactivas de nitrógeno conduce a la formación de especies nitradas, lo que da lugar a una menor eficiencia de degradación del MB y a la conversión de las moléculas de MB en subproductos, tales como el cloruro de [7-(dimetilamino)-4-nitrofenotiazina-3-ilideno]-dimetilazano, conocido comercialmente como verde de metileno (MG). Una posible vía para la formación de este y otros subproductos es la nitración del MB ($\lambda_{\text{MB}} = 663\text{--}637$ nm) por $\cdot\text{O}_2\text{N}$ para producir MG ($\lambda_{\text{MG}} = 690\text{--}550$ nm). Por lo tanto, la transformación del MB en sustancias que poseen longitudes de onda similares, como el MG, también podría explicar la relativa saturación de la OD de las soluciones de MB de 13 mg L⁻¹ tratadas con plasma antes de la reposición del agua evaporada. En consecuencia, se añadió agua desionizada a las soluciones de MB tratadas con plasma justo antes del análisis de los parámetros de calidad del agua, con el fin de evitar una concentración excesiva del colorante MB remanente, pero sin favorecer la neutralización de las posibles RONS y otras especies generadas durante el tratamiento con plasma.

Aunque los parámetros de calidad del agua se evaluaron al volumen final de la solución de MB (~ 142 mL) ya que las RONS podrían neutralizarse con la adición de agua, la reducción del volumen de las disoluciones puede comprometer la tendencia de los parámetros de calidad del agua. A pesar de que se han reportado diseños de reactores de plasma jet han sido diseñados con sistemas de enfriamiento para disipar el calor de los electrodos y con barreras adicionales entre los electrodos sumergidos y la solución de colorante, con el fin de evitar la evaporación de agua durante el tratamiento por plasma, estos suelen implicar un eleva el costo energético y de infraestructura ya que deben evitar la disminución de la eficacia del plasma (Kuwahata et al., 2010), o bien requieren reactores sellados y condensadores de vapor (Takemura et al., 2013; Wu et al., 2020). La tasa de evaporación reportada y otros resultados de

este estudio podrían utilizarse para diseñar configuraciones dinámicas e inversas de reactores de plasma que minimicen la evaporación de aguas residuales sin necesidad de sistemas de enfriamiento complejos. La Tabla 2 resume los valores de [MB], pH, ORP, EC y TDS obtenidos de la caracterización de las soluciones de MB de 13 mg L^{-1} ($n = 6$), mientras que la Tabla 3 compara los valores F de los determinantes τ con el parámetro de referencia $F_{\alpha=0.01} = 13.75$. Se encontró que la adición de MB y el tratamiento por plasma afectaron significativamente los valores de pH y ORP con respecto al agua desionizada, de acuerdo con el análisis LSD, lo que indica que el metiltioninio disuelto ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{N}^{+1}\text{S}$) y las especies iónicas y excitadas mediadas por el plasma acidificaron la solución. En este sentido, el tratamiento por plasma redujo significativamente la [MB] inicial de $12.5 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ hasta una [MB] final de $9.4 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$, alcanzando un valor de $D \approx 25 \%$, lo que indica que las especies reactivas y energéticas, así como posibles efectos físicos como la cavitación, degradaron las moléculas de MB.

Table 2. Untreated and plasma-treated 13 mg L^{-1} MB solutions characterizations results ($n = 6$).

τ	Preparation		Characterization				
	[MB]	Plasma	[MB] ^{NVE}	pH ^{NVE}	ORP ^{NVE}	EC ^{NVE}	TDS ^{NVE}
	(mg L^{-1})	(min)	(mg L^{-1})	(a.u.)	(mV)	($\mu\text{S cm}^{-1}$)	(mg L^{-1})
A	0	0	$0^{\check{\text{BCD}}}$	$5.1 \pm 0.2^{\text{BCD}}$	$185 \pm 10^{\text{BCD}}$	0^{BCD}	0^{BCD}
B [^]	0	60	$0^{\check{\text{ACD}}}$	$2.2 \pm 0.1^{\text{ACD}}$	$488 \pm 5^{\text{ACD}}$	$1219 \pm 12^{\text{ACD}}$	$608 \pm 5^{\text{ACD}}$
C	13	0	$12.5 \pm 0.1^{\text{ABD}}$	$5.1 \pm 0.1^{\text{ABD}}$	$203 \pm 5^{\text{ABD}}$	0^{ABD}	0^{ABD}
D [^]	13	60	$9.4 \pm 0.1^{*\text{ABC}}$	$3.4 \pm 0.3^{\text{ABC}}$	$431 \pm 6^{\text{ABC}}$	$1462 \pm 20^{\text{ABC}}$	$727 \pm 6^{\text{ABC}}$

* Se añadieron 108 mL de agua desionizada a la solución tratada con plasma.

^ indica que el tratamiento por plasma evaporó $\sim 104 \text{ mL}$ de agua desionizada.

✓ indica los valores originales de [MB] fueron $-0.285 \pm 0.002 \text{ mg L}^{-1}$ para el agua desionizada sin tratar y $-0.274 \pm 0.017 \text{ mg L}^{-1}$ para el agua desionizada tratada con plasma.

NVE indica que el análisis estadístico cumple con los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de errores.

$\tau \ni \{A, B, C, D\}$ indica que el valor de τ indicadp es significativamente diferente con respecto al correspondiente.

Tabla 3. Resultados del análisis estadístico ($n = 6$) de las soluciones de colorante sin tratar y tratadas con plasma para los valores transformados evaluados con el parámetro de potencia optimizado de Yeo–Johnson (φ). Los valores F de Fisher se compararon con el parámetro estadístico $F_{\alpha = 0.01} = 13.75$, y la probabilidad de rechazo erróneo de la igualdad de medias fueron siempre $p \ll 0.01$.

Determinant	[MB]	pH	ORP	EC	TDS
	$\varphi = 0.475$	$\varphi = 1.825$	$\varphi = 1.275$	$\varphi = -2.000$	$\varphi = -2.000$
AC (dye)	$\sim 4.7 \times 10^5$	$\sim 6.3 \times 10^2$	$\sim 7.4 \times 10^1$	$\sim 5.9 \times 10^2$	$\sim 1.2 \times 10^3$
BD (plasma)	$\sim 3.3 \times 10^3$	$\sim 1.3 \times 10^4$	$\sim 9.1 \times 10^3$	$\sim 3.7 \times 10^6$	$\sim 6.3 \times 10^6$
AC×BD (both)	$\sim 3.5 \times 10^3$	$\sim 6.5 \times 10^2$	$\sim 2.0 \times 10^2$	$\sim 5.9 \times 10^2$	$\sim 1.2 \times 10^3$

A pesar de que la capacidad del plasma jet de aire para degradar el MB es prometedora, es necesario considerar que la legislación mexicana establece que los responsables de generar descargas de aguas residuales y de producir agua para uso y consumo humano deben verificar de manera rutinaria el cumplimiento de los límites permisibles regulados (SEMARNAT, 2021; Secretaría de Salud, 1994). Las descargas de aguas residuales deben realizarse a 35 °C y con un intervalo de pH de 6 a 9, entre otras condiciones (los TDS, EC y ORP no son considerados por la legislación mexicana, pero son parámetros habituales de calidad del agua), así como presentar ausencia de turbidez visual; mientras que el agua para uso y consumo humano debe tener un pH de 6.5 a 8.5 y un contenido de TDS $\leq 1000 \text{ mg L}^{-1}$. Al comparar estas limitaciones con los resultados obtenidos de pH y TDS, puede afirmarse que el agua desionizada y las soluciones de MB tratadas con plasma no son adecuadas para ser descargadas directamente en cuerpos receptores de agua, ya que son demasiado ácidas y presentan turbidez visual, lo que implica que se requieren tratamientos adicionales o un ajuste de los parámetros de tratamiento para posibilitar su escalamiento.

Análisis estadístico de los resultados de la caracterización de las soluciones selectas

La Tabla B1 resume el conjunto de datos necesario para replicar los resultados del ANOVA de dos vías apoyado con LSD y las pruebas de supuestos correspondientes al agua desionizada y a las soluciones de MB de 13 mg L^{-1} , tanto sin tratar como tratadas con plasma, mientras que la Tabla B2 describe los resultados de las pruebas de supuestos del ANOVA estimadas con el respectivo parámetro de potencia φ , y la Figura B1 muestra la optimización de φ para cada parámetro medido. De acuerdo con los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk, puede afirmarse con una confianza $\geq 95 \%$ que

los residuos de [MB], pH y ORP siguen una distribución normal ya que $W_{SW} \ni \{1.0289_{[MB]}, 0.9711_{pH}, 1.0269_{ORP}\} > W_{\alpha=0.1} = 0.9302$, lo que implica una intervención mínima de factores ambientales en las mediciones de [MB], pH y ORP. Sin embargo, los valores de W_{SW} de EC y TDS fueron menores que el W_{α} referido, lo que indica que factores extraños influyeron en dichas mediciones, como lo es la presencia y posición de los valores de EC y TDS iguales a 0. Al fallar la prueba de normalidad, la evaluación estadística, prueba de Cochran y gráfica de independencia de los errores de EC y TDS se invalidan.

Por otra parte, los resultados de la prueba de varianza constante de Cochran revelaron con una confianza $\geq 95\%$ que las varianzas de [MB], pH y ORP no son significativamente diferentes entre sí ya que $G_C = \{0.4519_{[MB]}, 0.5317_{pH}, 0.4269_{ORP}\} < G_{\alpha=0.05} = 0.6761$, lo que indica que la variabilidad de sus mediciones fue significativamente similar entre los tratamientos respectivos. Además, la prueba gráfica de independencia de errores (Figura B2) muestra que la mayoría de los residuos de [MB], pH y ORP están ordenados aleatoriamente con respecto al orden de ejecución, lo que implica que las mediciones no estuvieron significativamente afectadas por el orden de los experimentos.

CONCLUSIONES

Este estudio reporta la concentración de azul de metileno y los parámetros de calidad del agua para una solución de MB de 13 mg L^{-1} antes y después del tratamiento con plasma jet de aire a presión atmosférica. Se estableció una curva de calibración validada estadísticamente ($R^2 \geq 0.995$) para la relación $OD = f([MB])$ utilizando soluciones de $0\text{--}13 \text{ mg L}^{-1}$; sin embargo, las muestras de MB preparadas recientemente mostraron una desviación de $\sim 3.9\%$ debido a la variabilidad en la preparación de las diluciones. La adición de 13 mg L^{-1} de MB y el tratamiento de las soluciones de colorante con plasma modificaron significativamente los valores de pH y ORP, y aunque no puede afirmarse estadísticamente lo mismo para la EC o los TDS, estos resultados indican que el $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{N}^{+1}\text{S}$ y el Cl^{-1} disueltos, así como las especies mediadas por el plasma, alteran la acidez del agua y su contenido iónico. La exposición al plasma provocó una evaporación considerable, reduciendo el nivel del agua hasta la boquilla después de 30 min y en $\sim 2.5 \text{ cm}$ después de 60 min, lo que corresponde a $\sim 108 \text{ mL}$ evaporados ($\sim 0.083 \text{ cm min}^{-1}$). Esta evaporación incrementó la OD más allá del rango de la curva de calibración, lo que sugiere la concentración de MB residual y de subproductos como el verde de metileno (MG). Tras

volver a añadir 108 mL de agua desionizada, el análisis espectroscópico reveló una degradación de MB de ~25 %, atribuida al efecto del tratamiento por plasma.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca (No. CVU 859503) otorgada al primer autor para realizar su estancia posdoctoral a través del proyecto SECIHTI CBF-2025-I-4203, así como al Departamento de Química Macromolecular y Nanotecnología y al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) (Saltillo, México) por proporcionar las instalaciones, los instrumentos y el equipo necesarios para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Fattah, E. (2019). Atmospheric pressure helium plasma jet and its applications to methylene blue degradation. *Journal of Electrostatics*, 101, 103360.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2019.103360>
- Aloui, N., Belgacem, I., Hamdan, A. (2024). Degradation of methylene blue by using an argon microwave plasma jet in humid environment. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 44(5), 1971-1989. <https://doi.org/10.1007/s11090-024-10494-4>
- 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>
- Chandana, L., Reddy, P. M. K., & Subrahmanyam, C. (2015). Atmospheric pressure non-thermal plasma jet for the degradation of methylene blue in aqueous medium. *Chemical Engineering Journal*, 282, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.027>
- Diamond, J., Profili, J., Hamdan, A. (2019). Characterization of various air plasma discharge modes in contact with water and their effect on the degradation of reactive dyes. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39(6), 1483-1498. <https://doi.org/10.1007/s11090-019-10014-9>
- Escalante Vázquez, E. J. (2014). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa.
<https://libreria-limusa.com/producto/disen-y-analisis-de-experimentos/>



- Foster, J. E., Adamovsky, G., Gucker, S. N., Blankson, I. M. (2013). A comparative study of the time-resolved decomposition of methylene blue dye under the action of a nanosecond repetitively pulsed DBD plasma jet using liquid chromatography and spectrophotometry. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(3), 503-512. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2245426>
- 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>
- Gil-Mora, J. E., Boza, Á. H. F., Ramos, K. J. O., Oviedo, N. A. V. (2022). Determinación de la pérdida de la calidad de un río urbano en Cusco: Caso Saphy. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(1), 3722-3748. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1765
- Gott, R. P., Thompson, M. E., Staton, B. C., Williams, B. M., & Xu, K. G. (2021). Analysis of time-resolved plasma jet emissions that drive methylene blue dye decomposition. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49(7), 2113-2124. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3089852>
- Hamdan, A., Gagnon, C., Aykul, M., Profili, J. (2020). Characterization of a microwave plasma jet (TIAGO) in-contact with water: Application in degradation of methylene blue dye. *Plasma Processes and Polymers*, 17(3), 1900157. <https://doi.org/10.1002/ppap.201900157>
- Invernizzi, L., Muja, C., Sainct, F. P., & Guillot, P. (2019). Investigation of RONS production and complex molecules degradation induced by an APPJ generated by two different sources. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 4(1), 121-129. <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2019.2918623>
- Jaiswal, S., & Aguirre, E. M. (2021). Comparison of atmospheric pressure argon producing O (1S) and helium plasma jet on methylene blue degradation. *AIP Advances*, 11(4). <https://doi.org/10.1063/5.0046948>
- Jiacun, W., Kaiyue, W., Chenhua, R., Pengying, J. I. A., Xuechen, L. I. (2020). Comparison of discharge characteristics and methylene blue degradation through a direct-current excited plasma jet with air and oxygen used as working gases. *Plasma Science and Technology*, 22(5), 055505. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ab6c00>



- Kasih, T. P., Kharisma, A., Perdana, M. K., Murphiyanto, R. D. J. (2017, December). Development of non-thermal plasma jet and its potential application for color degradation of organic pollutant in wastewater treatment. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 109, No. 1, p. 012004). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/109/1/012004>
- Kooshki, S., Pareek, P., Janda, M., Machala, Z. (2024). Selective reactive oxygen and nitrogen species production in plasma-activated water via dielectric barrier discharge reactor: an innovative method for tuning and its impact on dye degradation. *Journal of Water Process Engineering*, 63, 105477. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105477>
- Kuwahata, H., Kimura, K., Ohyama, R. I. (2010). Decolorization of methylene blue aqueous solution by atmospheric-pressure plasma jet. *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 8, 381-383. <https://doi.org/10.1380/ejssnt.2010.381>
- Kuwahata, H., Uchida, M., Oda, Y. (2018). Comparison of decolorization of methylene blue aqueous solutions irradiated with atmospheric-pressure plasma jet in air and in argon gas. *Proceedings of the School of Engineering of Tokai University*, 43, 8-16. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1050299461909340416>
- Li, X., Wang, B., Jia, P., Yang, L., Li, Y., Chu, J. (2017). Three modes of a direct-current plasma jet operated underwater to degrade methylene blue. *Plasma Science and Technology*, 19(11), 115505-115505. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aa86a6>
- Nishiyama, H., Nagai, R., Niinuma, K., Takana, H. (2013). Characterization of DBD multiple bubble jets for methylene blue decolorization. *Journal of fluid Science and technology*, 8(1), 65-74. <https://doi.org/10.1299/jfst.8.65>
- Qin, T., Nie, S., Ji, H., Xie, Z. (2023). Synergistic degradation and degradation pathways of methylene blue by plasma process combined with cavitation impinging stream reactor based on hydrodynamic cavitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110356. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110356>
- Secretaría de Salud. (1994). NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental – agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.



https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969

SEMARNAT. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022

Silva, F., Nascimento, L., Brito, M., da Silva, K., Paschoal Jr, W., Fujiyama, R. (2019). Biosorption of methylene blue dye using natural biosorbents made from weeds. *Materials*, 12(15), 2486.

<https://doi.org/10.3390/ma12152486>

Stancu, E. C., Piroi, D., Magureanu, M., Dinescu, G. (2011, July). Decomposition of methylene blue by a cold atmospheric pressure plasma jet source. In *Proceedings of the 20th International Symposium on Plasma Chemistry* (p. 375).

<http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc20/375.pdf>

Takemura, Y., Yamaguchi, N., Hara, T. (2013). Decomposition of methylene blue by using an atmospheric plasma jet with Ar, N₂, O₂, or air. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52(5R), 056102. <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.056102>

Tang, X., Chen, X., Liu, Y., Ssekasamba, H., Ren, K., Qiu, G. (2025). Investigation on simple atmospheric pressure plasma jet and its degradation of methylene blue solution. In *13th Annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering (MSEE 2025)* (Vol. 13811, pp. 118-123). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3085219>

Farfán, S. W. U., Rivera, R. J. C., Sánchez, R. N. L., Ramírez, S. P., Avila, J. C. S. (2022). Políticas públicas y la gestión de la calidad ambiental para la descontaminación de ríos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 927-952. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3586

Vo, D. T., Dinh, N. T., Le, T. H. T., Nguyen, D. T., Phan, L. T., Do, H. T., Mok, Y. S., Nguyen, D. B. (2025). Comprehensive analysis of experimental conditions in plasma–liquid interaction for the efficient removal of methylene blue. *RSC advances*, 15(19), 14756-14766.

<https://doi.org/10.1039/D5RA01066G>



Wattanawikkam, C., Bootchanont, A., Barnthip, N., Pavasupree, S., Jitjing, P., Boonyawan, D., Kachayut, K., Porjai, P. (2023). Discharge duty cycles effects of 20 kHz air atmospheric pressure plasma jet on methylene blue solution degradation. Suranaree Journal of Science & Technology, 30(2).

https://www.academia.edu/download/105345386/Wattanawikkam_2023_DISCHARGE_DUTY_CYCLES_EFFECTS_OF_20_KHZ_AIR.pdf

Weisberg, S. (2014). Applied linear regression. John Wiley & Sons.

<https://library.wur.nl/WebQuery/titel/538418>

Yeo, I. K., Johnson, R. A. (2000). A new family of power transformations to improve normality or symmetry. Biometrika, 87(4), 954-959. <https://doi.org/10.1093/biomet/87.4.954>



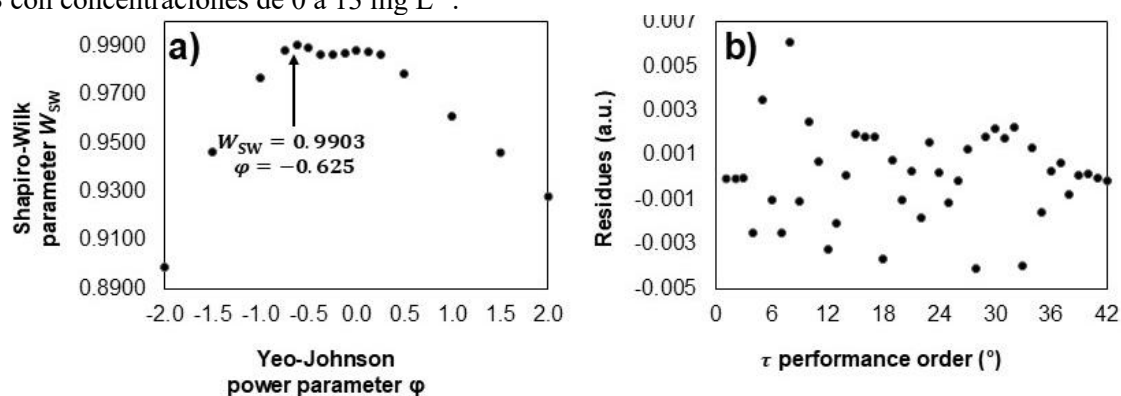
ANEXOS

Apéndice a: datos para el análisis estadístico de la curva de calibración

Tabla A1. Densidad óptica corregida (OD) de las soluciones de MB con concentraciones de 0 a 13 mg L⁻¹.

[MB] (mg L ⁻¹)	OD (a.u.)			[MB] (mg L ⁻¹)	OD (a.u.)		
	$r = 1$	$r = 2$	$r = 3$		$r = 1$	$r = 2$	$r = 3$
0	0.000	0.000	0.000	7	1.473	1.488	1.482
1	0.192	0.200	0.194	8	1.670	1.675	1.682
2	0.431	0.451	0.438	9	1.806	1.838	1.840
3	0.665	0.661	0.652	10	2.003	2.006	1.969
4	0.870	0.876	0.881	11	2.214	2.195	2.207
5	1.090	1.090	1.072	12	2.368	2.358	2.364
6	1.288	1.281	1.286	13	2.520	2.519	2.518

Figura A1. a) Parámetro de potencia de Yeo–Johnson (φ) comparado con el parámetro crítico de Shapiro–Wilk (W_{SW}); b) residuos transformados de OD obtenidos mediante la ley de potencia optimizada $T_{\varphi=0.55} = f(Y, \varphi)$, comparados con su respectivo orden de ejecución τ de las soluciones de MB con concentraciones de 0 a 13 mg L⁻¹.



Apéndice b: datos para el análisis estadístico de las soluciones tratadas con plasma

Tabla B1. Valores de densidad óptica corregida (OD), pH, ORP, k y TDS de las soluciones de MB con concentración inicial de 13 mg L⁻¹, sin tratar y tratadas con plasma

[MB] (mg L ⁻¹)	Plasma (min)	OD (a.u.)*					
		<i>r</i> = 1	<i>r</i> = 2	<i>r</i> = 3	<i>r</i> = 4	<i>r</i> = 5	<i>r</i> = 6
0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
	60	0.000	0.000	0.000	0.006	0.009	0.002
13	0	2.481	2.460	2.499	2.495	2.501	2.490
	60	1.902	1.879	1.878	1.868	1.894	1.886

[MB] (mg L ⁻¹)	Plasma (min)	pH (a.u.)					
		<i>r</i> = 1	<i>r</i> = 2	<i>r</i> = 3	<i>r</i> = 4	<i>r</i> = 5	<i>r</i> = 6
0	0	5.090	5.300	5.055	5.080	4.940	4.780
	60	2.180	2.200	2.230	2.270	2.220	2.250
13	0	5.220	5.010	4.880	5.010	5.030	5.060
	60	3.870	3.550	3.460	3.130	3.170	3.260

[MB] (mg L ⁻¹)	Plasma (min)	ORP (mV)					
		<i>r</i> = 1	<i>r</i> = 2	<i>r</i> = 3	<i>r</i> = 4	<i>r</i> = 5	<i>r</i> = 6
0	0	196	182	167	185	187	194
	60	494	488	487	479	487	491
13	0	209	208	205	202	196	197
	60	443	428	424	428	429	431

[MB] (mg L ⁻¹)	Plasma (min)	EC (μS cm ⁻¹)					
		<i>r</i> = 1	<i>r</i> = 2	<i>r</i> = 3	<i>r</i> = 4	<i>r</i> = 5	<i>r</i> = 6
0	0	0	0	0	0	0	0
	60	1206	1242	1210	1165	1219	1188
13	0	0	0	0	0	0	0
	60	1483	1465	1423	1457	1465	1481

[MB] (mg L ⁻¹)	Plasma (min)	TDS (mg L ⁻¹)					
		<i>r</i> = 1	<i>r</i> = 2	<i>r</i> = 3	<i>r</i> = 4	<i>r</i> = 5	<i>r</i> = 6
0	0	0	0	0	0	0	0
	60	605	616	601	607	607	611
13	0	0	0	0	0	0	0
	60	724	727	716	727	730	737

Tabla B2. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk (W_{SW}) y de la prueba de varianza constante de Cochran (G_C) para los valores transformados de [MB] y de los parámetros de calidad del agua ($n = 6$), calculados mediante leyes de potencia $T = f(Y, \varphi)$ evaluadas con parámetros de potencia φ optimizados

Parámetro	[MB]	Ph	ORP	EC	TDS	Referencia
Valores originales $T = f(\varphi = 1)$						
W_{SW}	0.9572	0.9641	1.0082	0.7992	0.8345	$W_{\alpha=0.1} = 0.9302$
G_C	0.5899	0.6459	0.5229	0.7427	0.6426	$G_{\alpha=0.05} = 0.6761$
Valores transformados optimizados $T = f(\varphi \neq 1)$						
φ	0.475	1.825	1.275	-2.000	-2.000	-
W_{SW}	1.0289	0.9711	1.0269	0.8584	0.8413	$W_{\alpha=0.1} = 0.9302$
G_C	0.4159	0.5317	0.4269	0.5092	0.6158	$G_{\alpha=0.05} = 0.6761$

Figure B1. Parámetros de potencia de Yeo–Johnson (φ) comparado con el parámetro crítico de Shapiro–Wilk (W_{SW}) para los valores transformados de [MB] y de los parámetros de calidad del agua ($n = 6$), calculados mediante leyes de potencia $T = f(Y, \varphi)$.

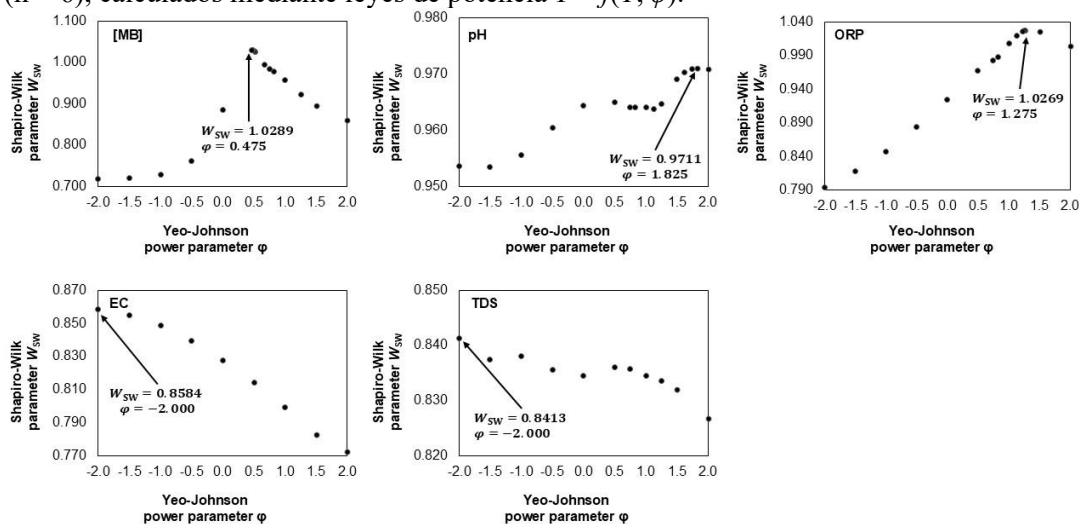


Figure B2. Residuos transformados obtenidos mediante leyes de potencia optimizadas $T = f(Y, \varphi)$, comparados con su respectivo orden de ejecución τ de las soluciones de MB con concentraciones de 0 a 13 mg L⁻¹, donde para [MB] $\varphi = 0.475$, para pH $\varphi = 1.825$, para ORP $\varphi = 1.275$ y para EC y TDS $\varphi = -2.000$.

