

Estudio electroquímico de los procesos redox del paracetamol empleando ultramicroelectrodos de fibra de carbono

Electrochemical study of the redox processes of paracetamol using carbon fiber ultramicroelectrodes

A. M. Islas-Campos ^a, C.H. Rios-Reyes ^a, L. H. Mendoza Huizar ^{a,*}^a Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio electroquímico del paracetamol mediante voltamperometría cíclica sobre un ultramicroelectrodo de fibra de carbono (FC-UME) de 7 μm de diámetro. Las mediciones se realizaron a partir de una solución acuosa de paracetamol 0.01 M con KCl 0.1 M como electrolito soporte, empleando una celda de tres electrodos (Ag/AgCl como referencia y grafito como contraelectrodo). La relación lineal entre la corriente de pico y la raíz cuadrada de la velocidad de barrido confirmó que el proceso está controlado por difusión. Los voltamperogramas evidenciaron la presencia de un mecanismo electroquímico-químico (EC) irreversible. Además, el análisis de Tafel permitió calcular coeficientes de transferencia de carga para los picos anódicos y catódicos.

Palabras Clave: Voltametría, Paracetamol, Proceso redox, Difusión, Coeficiente de transferencia de carga.

Abstract

In this work, an electrochemical study of paracetamol was conducted using cyclic voltammetry on a carbon fiber ultramicroelectrode (FC-UME) with a diameter of 7 μm . Measurements were performed using an aqueous solution of 0.01 M paracetamol with 0.1 M KCl as the supporting electrolyte, employing a three-electrode cell (Ag/AgCl as reference and graphite as counter electrode). The linear relationship between the peak current and the square root of the scan rate confirmed that the process is diffusion-controlled. The voltammograms revealed an irreversible electrochemical-chemical (EC) mechanism. Additionally, Tafel analysis allowed the calculation of charge transfer coefficients for both anodic and cathodic peaks.

Keywords: Voltammetry, Paracetamol, Redox process, Diffusion, Charge transfer coefficient.

1. Introducción

En la última década, el interés por el impacto de los compuestos farmacéuticos y sus metabolitos en los cuerpos de agua ha aumentado de manera significativa. Esta preocupación no solo se debe a sus efectos sobre los ecosistemas acuáticos, sino también a su potencial impacto en la salud humana, derivado de su persistencia y bioacumulación en el ambiente. En respuesta, numerosos grupos de investigación han enfocado sus esfuerzos en la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales y métodos para la detección y cuantificación de estos contaminantes en aguas naturales y residuales. Estas estrategias buscan identificar incluso trazas de dichos compuestos con el propósito de evaluar su distribución, persistencia y riesgo ecotoxicológico (Leyva, Moctezuma, Baines, Noriega, & Zarazua, 2017). Entre los fármacos más comúnmente detectados se encuentra el paracetamol, también

conocido como acetaminofén (PAM), N-(4-hidroxifenil) acetamida o 4-acetamidofenol, ver Figura 1. Esta molécula forma parte de la estructura básica de varios anestésicos, como la lidocaína (Ayoub, 2021). El paracetamol (PAM) se utiliza ampliamente como analgésico, antipirético y antiinflamatorio, y su uso excesivo se ha visto favorecido por la facilidad de adquisición sin receta médica, lo que ha incrementado la automedicación. Este fenómeno ha provocado un aumento en la cantidad de PAM consumido y, consecuentemente, en su excreción hacia las aguas residuales. Debido a lo anterior, el PAM es comúnmente detectado en aguas superficiales en concentraciones que varían desde partes por millón hasta microgramos por litro (Ali Gamal, Naji, & Abdullah, Qais Yusuf Mohammed Edrees, 2017). Su toxicidad acuática se atribuye principalmente a los grupos fenólicos presentes en su estructura química (H., 2006). Desde el punto de vista químico, esta toxicidad está relacionada con sus propiedades ácido-base

*Autor para la correspondencia: hhuizar@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: is435328@uaeh.edu.mx (Alba María Islas-Campos), clara_rios@uaeh.edu.mx (Clara Hilda Ríos-Reyes), hhuizar@uaeh.edu.mx (Luis Humberto Mendoza Huizar).

Historial del manuscrito: recibido el 28/08/2025, última versión-revisada recibida el 30/10/2025, aceptado el 31/10/2025, publicado el 12/12/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial4.15781>



y su solubilidad. El PAM es un ácido débil con un pK_a de 9.4, lo que influye en su comportamiento en medios acuosos. Además, su solubilidad a 20°C es de aproximadamente 1.4 g/100 mL en agua, y también presenta buena solubilidad en solventes orgánicos como etanol, metanol y dimetilformamida, lo que facilita su disolución y persistencia en diversos ambientes acuáticos.

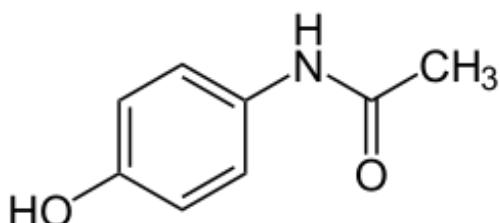


Figura 1. Estructura del paracetamol

Aunque el PAM no suele causar irritación gástrica cuando se usa en dosis terapéuticas, su consumo excesivo o combinado con alcohol puede provocar insuficiencia hepática e incluso la muerte (Nematollahi, Shayani-Jam, Alimoradi, & Niroomand, 2009). Además, su persistencia en el medio ambiente representa un riesgo tanto para la fauna acuática como para la salud humana (Ban, Guo, & Fu, 2025). Ante esta problemática, la detección precisa y temprana del PAM en matrices acuosas resulta fundamental para evaluar su distribución y diseñar estrategias de mitigación eficaces. Diversas técnicas analíticas se han empleado con este propósito, entre ellas la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y la espectrofotometría UV-Visible, que ofrecen alta selectividad y sensibilidad. Sin embargo, los métodos electroquímicos han cobrado especial relevancia en los últimos años para la detección de compuestos electroactivos como el PAM, gracias a su simplicidad, bajo costo, rapidez de respuesta y posibilidad de miniaturización (Kaswan, Dhatterwal, & Kumar, 2024). En este contexto, los procesos de oxidación avanzada y electrooxidación destacan por su alta sensibilidad y su potencial para la detección simultánea y cuantificación del PAM (Leyva, Moctezuma, Baines, Noriega, & Zarazua, 2017). No obstante, el desarrollo de materiales más eficientes y estables que funcionen como electrodos sigue siendo un desafío clave para mejorar la sensibilidad, selectividad y reproducibilidad de estas técnicas.

Diversos tipos de electrodos se han utilizado para la determinación electroquímica de PAM y otros fármacos en medios acuosos, incluyendo electrodos de carbón vitro, diamante dopado con boro y electrodos modificados con nanopartículas metálicas de oro, platino, níquel y zinc (Boumya, W., Taoufik, N., Achak, M., Bessbousse, H., Elhalil, A., & Barka, N., 2021). Los electrodos de pasta de carbón, ampliamente usados en la fabricación de quimiosensores y biosensores, destacan por su versatilidad y eficiencia analítica tras la modificación de su superficie (Alghamdi, 2010). Sin embargo, hasta la fecha no se ha reportado un estudio electroquímico utilizando ultramicroelectrodos de fibra de carbono (FC-UME) para la detección de PAM. Los FC-UME presentan numerosas ventajas para aplicaciones electroanalíticas, especialmente en la detección de compuestos

farmacéuticos como el paracetamol. Su reducido tamaño, en el orden de micras, permite una alta sensibilidad y una respuesta rápida debido al establecimiento veloz de un estado estacionario en la difusión del analito (Bard & Faulkner, 2001). Además, ofrecen mejor resolución espacial y requieren menor volumen de muestra, lo que facilita estudios detallados del comportamiento electroquímico del fármaco en medios acuosos. Dado lo anterior, en este trabajo se presenta un estudio electroquímico utilizando un FC-UME de 7 micras de diámetro, enfocado en la identificación y caracterización de los parámetros electroquímicos asociados a los procesos redox del PAM en un medio acuoso.

2. Metodología

Todos los experimentos voltamperométricos se llevaron a cabo utilizando un potenciómetro EC-BASi Epsilon, controlado mediante el software BASi Epsilon EC, en una celda electroquímica de tres electrodos. Como electrodo de referencia se empleó un electrodo Ag/AgCl, mientras que el contraelectrodo fue de grafito. El electrodo de trabajo consistió en un ultramicroelectrodo de fibra de carbono con un diámetro de 7 μm . El FC-UME se construyó empleando la metodología reportada en la literatura (Bravo-Rodríguez, Álvarez-Romero, Rivera, García-Sánchez, & Mendoza-Huizar, 2022) y el mismo electrodo fue utilizado en todos los experimentos. Antes de cada experimento el FC-UME se pulió con gamma-alumna de 3 nm de diámetro promedio y la superficie limpia se expuso a una solución de etanol para eliminar la posibilidad de contaminantes (Gevaerd, Silva, Oliveira, Marcolino Júnior, & Bergamini, 2020). Antes de cada experimento la solución presente en la celda electroquímica se burbujeó con nitrógeno de ultra alta pureza durante 15 minutos para eliminar el oxígeno presente en la solución. Todos los experimentos se realizaron por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados. Las mediciones se realizaron a partir de una solución acuosa que contenía 0.01 M de PAM disuelto en 0.1 M de KCl. En todos los casos, el barrido se inició en sentido anódico, comenzando en -0.2 V y finalizando en 1.0 V.

3. Discusión de resultados

La superficie electroactiva disponible en un electrodo es un factor clave en la interpretación de los resultados electroquímicos, ya que determina la magnitud de la corriente medida y refleja la extensión real de las reacciones que ocurren en la interfaz electrodo-electrolito. Este factor es especialmente importante en la mayoría de los electrodos, debido a que influye directamente en la densidad de corriente, la eficiencia del proceso y la reproducibilidad de las mediciones electroquímicas. Bajo ciertas condiciones, el área electroactiva puede considerarse equivalente al área geométrica, particularmente cuando la superficie del electrodo es lisa, homogénea y libre de defectos, de modo que toda la superficie expuesta participa de manera uniforme en los procesos electroquímicos (Zaghib, Song, Xie, & Holze, 2022). En el caso de los FC-UME se ha reportado que la fibra de carbono presenta una superficie uniforme, compacta, lisa, pulida y libre de defectos significativos (De Alwis, Denison, Shah, McCarty, & Sombers, 2023) (Mohammadzadeh Kakhki,

2019). Adicionalmente, es importante mencionar que en un ultramicroelectrodo la difusión es de tipo hemisférico, y el espesor efectivo de la capa de difusión es comparable al radio del electrodo. Para el caso del FC-UME de 7 μm utilizado en este trabajo la capa de difusión se puede estimar como (Bard & Faulkner, 2001):

$$\delta \approx \sqrt{\pi D t} \quad (1)$$

Si se considera un valor típico del coeficiente de difusión de $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, y una capa de difusión equivalente al radio del electrodo del FC-UME, este espesor se alcanza en 4 ms aproximadamente. Por lo que a tiempos de la misma magnitud o mayores la difusión se establece un régimen hemisférico/estacionario, esto es, la capa efectiva de difusión es del orden del radio del FC-UME. En consecuencia, si la rugosidad superficial o las irregularidades son del orden de nanómetros, la capa de difusión, mucho más gruesa, no sigue dichas irregularidades. Esto significa que la capa de difusión es comparable o incluso mayor que el tamaño de la rugosidad superficial típica, lo que justifica usar en este trabajo el área geométrica del FC-UME para calcular la densidad de corriente. Dado lo anterior los resultados en este trabajo se reportan con respecto al área geométrica del FC-UME.

Con la intención de evaluar el comportamiento electroquímico del paracetamol sobre la superficie del FC-UME y determinar los parámetros cinéticos asociados a su proceso redox, se llevó a cabo un estudio voltamperométrico a diferentes velocidades de barrido, en el rango de 5 a 200 mV s^{-1} . La Figura 2 muestra un voltamperograma cíclico representativo obtenido a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} , utilizando una ventana de potencial de -0.2 V a 1.0 V y se compara con el voltamperograma obtenido a partir del electrolito soporte a la misma velocidad. En el voltamperograma se identifican dos picos anódicos (oxidación), etiquetados como I y II, y dos picos catódicos (reducción), denominados III y IV. El pico II de oxidación se presenta a un potencial de aproximadamente de 0.70 V, con una densidad de corriente de 0.0122 A cm^{-2} , mientras que el pico I aparece a 0.37 V con una densidad de corriente de $0.00159 \text{ A cm}^{-2}$. En la etapa de reducción, el pico III se registra a 0.50 V con una densidad de corriente de 0.0005 A cm^{-2} , y el pico IV a 0.16 V con una densidad de corriente de 0.0017 A cm^{-2} .

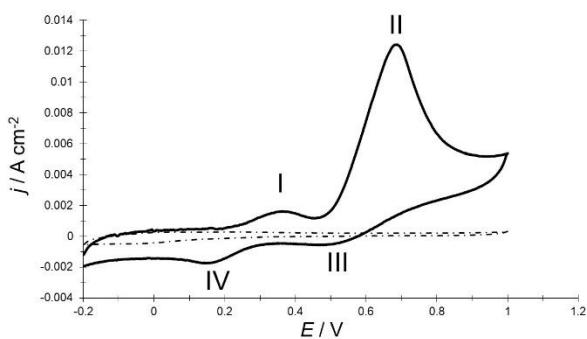


Figura 2 Voltamperogramas obtenidos a 20 mV s^{-1} para el sistema (—) FC-UME/0.01 M de paracetamol en 0.1 M KCl y (- -) FC-UME/0.1 M KCl

En la literatura se ha reportado que el proceso redox del PAM sigue un mecanismo electroquímico-químico (EC) y se han relacionado los picos I y II a la oxidación del paracetamol. Sin embargo, no existe consenso sobre las especies químicas asociadas a cada pico (Nieto Rebeca, Yris, Jesús, Reynaldo, & Nieto, 2015; Rodrigues Filho et al., 2016; Zidan, Tee, Abdullah, Zainal, & Kheng, 2011). Con base en la información disponible en la literatura, se propone que el primer pico anódico (I), ubicado a 0.37 V con una densidad de corriente de $0.00159 \text{ A cm}^{-2}$, corresponde a la oxidación inicial del paracetamol, que implica la transferencia de un electrón para formar un radical cation intermedio ($\text{PAM}^{\bullet+}$). Esta etapa se asocia a la fase electroquímica del mecanismo EC. El segundo pico anódico (II), que aparece alrededor de 0.70 V con una densidad de corriente considerablemente mayor (0.0122 A cm^{-2}), está asociada a la oxidación subsiguiente del radical intermedio, dando lugar a la formación de N-acetil-p-benzoquinona imina (quinonimino), un compuesto electroquímicamente activo y químicamente reactivo (Nieto Rebeca et al., 2015; Rodrigues Filho et al., 2016; Zidan et al., 2011). Esta oxidación también corresponde a una etapa electroquímica seguida de una reacción química posterior. Durante la fase de reducción, el pico catódico III, observado a 0.50 V con una densidad de corriente de 0.0005 A cm^{-2} , se relaciona con la reducción electroquímica del quinonimino, proceso en el que este compuesto se convierte parcialmente en paracetamol o en especies químicas relacionadas. Este pico representa la fase química del mecanismo EC, donde la reacción química está acoplada a la transferencia electrónica. Esto se evidencia porque la corriente de reducción de este pico es mucho menor que la corriente correspondiente al pico II, lo que sugiere que la cantidad de especie disponible para reducirse disminuye debido a una conversión química. Finalmente, el pico catódico IV, situado a 0.16 V con una densidad de corriente de 0.0017 A cm^{-2} , se atribuye a la reducción de productos secundarios derivados de reacciones químicas acopladas, como la dimerización o la formación de productos resultantes de la degradación del paracetamol oxidado (Nieto Rebeca et al., 2015; Rodrigues Filho et al., 2016; Zidan et al., 2011). Este pico refleja procesos químicos posteriores que también involucran transferencia de electrones. Dado lo anterior, el análisis voltamperométrico confirma que la oxidación del PAM sobre el FC-UME sigue un mecanismo electroquímico-químico.

Se analizó también la influencia de la velocidad de barrido con el objetivo de comprender su efecto sobre la cinética del proceso electroquímico del PAM en la superficie del FC-UME. La Figura 3 muestra voltamperogramas representativos obtenidos a velocidades de barrido en el rango de 5 a 200 mV s^{-1} . Los voltamperogramas indican que existe una dependencia de la respuesta electroquímica con respecto a la velocidad de barrido. Al aumentar esta, se observa un incremento en la intensidad de los picos anódico y catódico, lo que indica que la corriente generada depende de la rapidez con la que el analito alcanza la superficie del electrodo. Esto sugiere un control cinético, donde la difusión del paracetamol hacia el electrodo constituye el factor limitante en la velocidad de la reacción. Además, el desplazamiento del potencial del pico anódico hacia valores más positivos con el aumento de la velocidad es característico de procesos electroquímicos irreversibles, ya que

se requiere un mayor sobrepotencial para que ocurra la oxidación a mayores velocidades de barrido. De manera similar, el desplazamiento del pico catódico hacia potenciales más negativos también indica irreversibilidad en la etapa de reducción. Estos desplazamientos en los potenciales de pico con la velocidad de barrido confirman que las reacciones redox del PAM en el FC-UUME presentan una cinética limitada por la difusión y un mecanismo electroquímico irreversible.

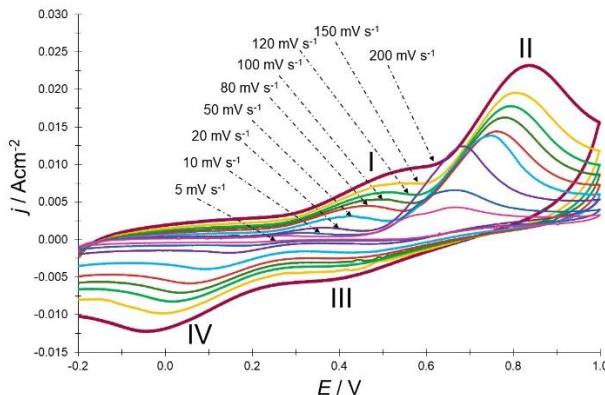


Figura 3. Voltamperogramas obtenidos a diferentes velocidades de barrido para el sistema FC-UUME/0.01 M de paracetamol en 0.1 M KCl.

Se analizó el comportamiento de la corriente de pico (j_p) en función de la raíz cuadrada de la velocidad de barrido ($v^{1/2}$) para los diferentes picos observados en la Figura 3, siguiendo la ecuación de Randles-Sevcik (J. E. B. Randles, 1947). Las corrientes de los picos se determinaron tomando el valor máximo de corriente correspondiente a cada pico en las curvas voltamperométricas obtenidas para cada velocidad de barrido, dicho valor se midió a partir de la intersección entre la línea base y el máximo local de la señal. El trazado de j_p versus $v^{1/2}$ mostró una tendencia lineal, ver Figura 4, lo que confirma que la cinética electroquímica está controlada por difusión.

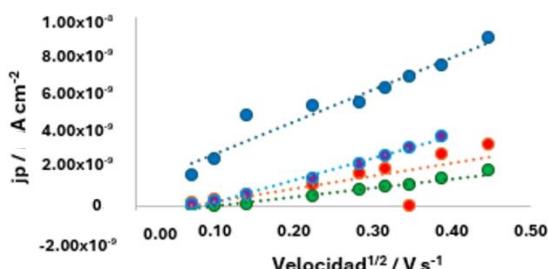


Figura 4. Trazado de j_p versus $v^{1/2}$ para los picos I (●), II (●), III (●) y IV (●). a partir del sistema FC-UUME/0.01 M de paracetamol en 0.1 M de KCl,

A partir de la pendiente de cada recta correspondiente a los diferentes picos mostrados en la Figura 4, se evaluó el coeficiente de difusión utilizando la ecuación de Randles-Sevcik (Ec. 2):

$$j_p = 2.69 \times 10^3 n^{3/2} AC \sqrt{Dv} \quad (2)$$

donde j_p es la corriente máxima en amperios, n es el número de electrones transferidos, A es el área del electrodo en cm^2 , D es el coeficiente de difusión en $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, C la concentración en mol cm^{-3} , y v la velocidad de barrido en V s^{-1} . Utilizando las

pendientes obtenidas en los gráficos de j_p versus $v^{1/2}$ para los picos I, II, III y IV, se calcularon los coeficientes de difusión correspondientes. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de coeficientes de difusión (D) asociados a los procesos electroquímicos identificados en los voltamperogramas registrados a partir del sistema FC-UUME/0.01 M de paracetamol en 0.1 M KCl , ver Figura 3.

Proceso	D (cm ² /s)
Pico anódico I	3.33×10^{-5}
Pico anódico II	5.37×10^{-6}
Pico catódico III	2.82×10^{-6}
Pico catódico IV	1.54×10^{-5}

Adicionalmente, se realizó el trazado de $\log j_p$ versus $\log v$ (Figura 5). La pendiente obtenida, cercana a 0.4, indica que el proceso electroquímico está predominantemente controlado por difusión, aunque puede existir una ligera contribución de otros mecanismos, como adsorción o efectos cinéticos adicionales (Bard & Faulker, 2001; Hong-Ru, Yun-Dan, Guo-Ying, & Hong-Liang, 2012)

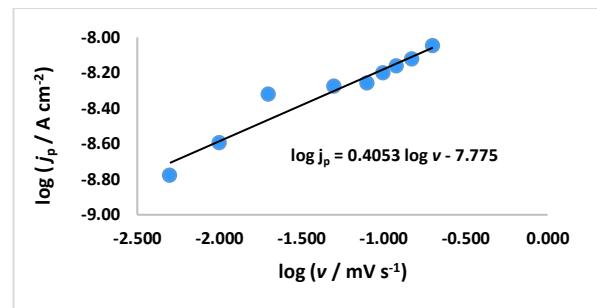


Figura 5. Gráfica $\log j_p$ vs $\log v$

La Figura 6 muestra el gráfico de E_p versus $\log v$, que permite determinar el coeficiente de transferencia de carga, la constante cinética de transferencia de electrones y la reversibilidad del proceso electroquímico (Mendoza-Huizar, 2024). La pendiente obtenida de 0.1118, evidencia el desplazamiento del potencial de pico al aumentar la velocidad de barrido, un comportamiento típico de procesos electroquímicos irreversibles. En procesos reversibles, caracterizados por una rápida transferencia electrónica, el potencial de pico permanece constante independientemente de la velocidad de barrido (Bard & Faulker, 2001; Hong-Ru, Yun-Dan, Guo-Ying, & Hong-Liang, 2012). En contraste, en sistemas irreversibles, la cinética más lenta provoca un desplazamiento sistemático de E_p con la velocidad de barrido (Bard & Faulker, 2001; Hong-Ru, Yun-Dan, Guo-Ying, & Hong-Liang, 2012). Esta relación lineal entre E_p y $\log v$ confirma la presencia de un proceso irreversible controlado por difusión, que se describe mediante la ecuación (Bard & Faulker, 2001; Hong-Ru, Yun-Dan, Guo-Ying, & Hong-Liang, 2012):

$$E_p = \frac{2.3RT}{n\alpha F} \log v + c_1 \quad (3)$$

donde R es la constante de los gases, T la temperatura en Kelvin, α el coeficiente de transferencia de carga, n el número de electrones transferidos, F la constante de Faraday y c_1 una

constante. El coeficiente α se determinó a partir del valor de la pendiente de la recta representada por la ecuación 3. Sustituyendo los valores correspondientes, se obtuvieron los siguientes coeficientes de transferencia de carga: 0.219 para el pico anódico I, 0.351 para el pico anódico II, 0.217 para el pico catódico III y 1.0 para el pico catódico IV. Los valores de estos coeficientes reflejan diferencias significativas, por ejemplo el valor de 1.0 para el pico catódico IV, sugiere una transferencia de carga eficiente. Por otro lado, los valores bajos obtenidos para los procesos asociados a los picos I, II y III sugieren una transferencia de carga moderadamente lenta.

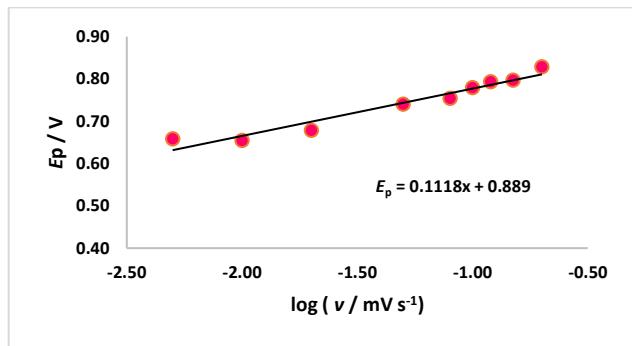


Figura 6. Gráfica E_p vs $\log v$

4. Conclusiones

En el presente trabajo, se analizó y caracterizó el mecanismo electroquímico del paracetamol (PAM) sobre la superficie de un ultramicroelectrodo de fibra de carbono (FC-UME). Los resultados indican que los procesos anódicos y catódicos asociados al PAM se encuentran controlados por difusión. Adicionalmente la variación del potencial de pico con $\log v$ indicaron los procesos anódicos y catódicos registrados son electroquímicamente irreversibles.

Agradecimientos

AMIC agradece al CONAHCyT la beca como ayudante de investigador SNI III para realizar el presente trabajo. Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México (LNS), perteneciente al padrón de laboratorios nacionales CONAHCYT, por los recursos computacionales, el apoyo y la asistencia técnica brindados, a través del proyecto No. 202501011N. Guanajuato National Laboratory (CONACyT 123732) is acknowledged for supercomputing resources

Referencias

- Alghamdi, A. H. (2010). Applications of stripping voltammetric techniques in food analysis. *Arabian Journal of Chemistry*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2009.12.001>
- Ali Gamal, A.-K., Naji, K. M., & Abdullah, Qais Yusuf Mohammed Edrees, W. H. A. (2017). Occurrence of Paracetamol in Aquatic Environments and Transformation by Microorganisms: A Review. *Chronicles of Pharmaceutical Science*, 1(6), 341–355. Retrieved from https://www.scienciaricerca.com/srcops/SRCOPS-01-00033.php?utm_source=chatgpt.com
- Ayoub, S. S. (2021). Paracetamol (acetaminophen): A familiar drug with an unexplained mechanism of action. *Temperature: Multidisciplinary Biomedical Journal*, 8(4), 351. <https://doi.org/10.1080/23328940.2021.1886392>
- Ban, X., Guo, W., & Fu, Y. (2025). Impact of Environmental Factors on Aquatic Ecosystem. *Water* 2025, Vol. 17, Page 1453, 17(10), 1453. <https://doi.org/10.3390/W17101453>
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Métodos electroquímicos. Fundamentos y aplicaciones* (2a ed.). Wiley Nueva York.
- Boumya, W., Taoufik, N., Achak, M., Bessbousse, H., Elhalil, A., & Barka, N. (2021). Electrochemical sensors and biosensors for the determination of diclofenac in pharmaceutical, biological and water samples. *Talanta Open*, 3(December). <https://doi.org/10.1016/j.talo.2020.100026>
- Bravo-Rodríguez, A. S., Álvarez-Romero, G. A., Rivera, M., García-Sánchez, E., & Mendoza-Huizar, L. H. (2022). Palladium Electrodeposition Onto a Carbon Fiber Ultramicroelectrode. *Croatica Chemica Acta*, 95(2), 49–55. <https://doi.org/10.5562/cca3923>
- De Alwis, A. C., Denison, J. D., Shah, R., McCarty, G. S., & Sombers, L. A. (2023). Exploiting Microelectrode Geometry for Comprehensive Detection of Individual Exocytosis Events at Single Cells. *ACS Sensors*, 8(8), 3187–3194. <https://doi.org/10.1021/ACSENSORS.3C00884>
- Gevaerd, A., Silva, B. M. Da, Oliveira, P. R. De, Marcolino Júnior, L. H., & Bergamini, M. F. (2020). A carbon fiber ultramicroelectrode as a simple tool to direct antioxidant estimation based on caffeic acid oxidation. *Analytical Methods*, 12(28), 3608–3616. <https://doi.org/10.1039/DOMY01050B>
- H., S. (2006). Eficacia entre paracetamol e ibuprofeno en el manejo del dolor postoperatorio, en niños programados para cirugía abdominal del Dr. General Ignacio Zaragoza del ISSSTE.
- Hong-Ru, Z., Yun-Dan, Y., Guo-Ying, W., & Hong-Liang, G. (2012). FePt thin films electrodeposited from non-aqueous liquids. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(6), 5544–5556. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)19641-6](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)19641-6)
- J. E. B. Randles. (1947). Kinetics of rapid electrode reactions. *Discussions of the Faraday Society*, 1(11).
- Kaswan, K. S., Dhatterwal, J. S., & Kumar, S. (2024). Wearable electrochemical and biosensors for forensic analysis: Challenges and research directions. *Self-Powered Sensors: A Path to Wearable Electronics*, 109–137. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13792-1.00015-8>
- Leyva, E., Moctezuma, E., Baines, K. M., Noriega, S., & Zarazua, E. (2017). A review on chemical advanced oxidation processes for pharmaceuticals with paracetamol as a model compound. Reaction conditions, intermediates and total. *Benthamdirect.Com*, 22(1), 2–17. <https://doi.org/10.2174/1385272821666171019145520>
- Mohammadzadeh Kakhki, R. (2019). A review to recent developments in modification of carbon fiber electrodes. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 1783–1794. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2014.11.058>
- Mendoza-Huizar, L. H. (2024). Electrodeposition of palladium nanoparticles onto indium tin oxide glass electrode. A kinetical and morphological study and effect of the potential in the particle size. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-06134-8>
- Nematollahi, D., Shayani-Jam, H., Alimoradi, M., & Niroomand, S. (2009). Electrochemical oxidation of acetaminophen in aqueous solutions: Kinetic evaluation of hydrolysis, hydroxylation and dimerization processes. *Electrochimica Acta*, 54(28), 7407–7415. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.07.077>
- Nieto Rebeca, R., Yris, M., Jesús, M., Reynaldo, O., & Nieto, R. (2015). Estudio in situ por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier de la oxidación electroquímica del acetaminofén en medio acuoso. *Rev Fac Farm*, 57(1), 9–16.
- Ortúzar, M., Esterhuizen, M., Olicón-Hernández, D. R., González-López, J., & Aranda, E. (2022). Pharmaceutical Pollution in Aquatic Environments: A Concise Review of Environmental Impacts and Bioremediation Systems. *Frontiers in Microbiology*, 13, 869332. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.869332/XML>
- Rodrigues Filho, G., Almeida, F., Ribeiro, S. D., Tormin, T. F., Muñoz, R. A. A., Assunção, R. M. N., & Barud, H. (2016). Controlled release of drugs from cellulose acetate matrices produced from sugarcane bagasse: monitoring by square-wave voltammetry. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 42(7), 1066–1072. <https://doi.org/10.3109/03639045.2015.1107093>
- Zaghib, K., Song, S.-W., Xie, X., & Holze, R. (2022). Electrode Kinetic Data: Geometric vs. Real Surface Area. *Batteries* 2022, Vol. 8, Page 146, 8(10), 146. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES8100146>
- Zidan, M., Tee, T. W., Abdullah, A. H., Zainal, Z., & Kheng, G. J. (2011). Electrochemical oxidation of paracetamol mediated by nanoparticles bismuth oxide modified glassy carbon electrode. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(2), 279–288. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)14994-7](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)14994-7)