



Detección electroquímica de fenoles-clorados

Electrochemical detection of chlorophenols

Irving Yare Rodríguez Rueda ¹, Sophia Covarrubias Luna ¹, Elsa Adriana Camarillo Jiménez ¹, Rocío Aguilar Sánchez ^{1,*}

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

* Autor de correspondencia: rocio.aguilar@correo.buap.mx; Tel: + 52 (222) 2295500, Ext. 3775.

Fecha de Recepción: 20 de julio del 2026.

Fecha de Revisión: 20 de agosto del 2026.

Fecha de Publicación: 30 de septiembre del 2026.

ISSN: 3061-838X.

DOI: 10.82580/revateh.v3i3.64

Citación: Irving Yare Rodríguez Rueda, Sophia Covarrubias Luna, Elsa Adriana Camarillo Jiménez, Rocío Aguilar Sánchez. Detección electroquímica de fenoles-clorados. Revista en Ciencia y Tecnología del Valle de Tehuacán, 2026, 3, 16-25.

Copyright: © 2026 por los autores. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.

Resumen

Los clorometilfenoles, son compuesto aromáticos que se usan ampliamente como intermediarios en la producción de pesticidas, desinfectantes, resinas y otros productos químicos industriales. Su presencia en cuerpos de agua y efluentes industriales representa un riesgo ambiental considerable, ya que estos compuestos exhiben toxicidad para organismos acuáticos y resistencia a la degradación biológica. El entendimiento de sus mecanismos de degradación y de transferencia electrónica, es fundamental en el control y monitoreo de su presencia en efluentes industriales y aguas residuales. La posible identificación de las rutas de transformación oxidativa resulta esencial para optimizar estrategias de degradación y minimizar la formación de intermediarios tóxicos. El presente trabajo muestra estudios electroanalíticos para la detección y electrooxidación de 4-cloro-3-metilfenol (4C3MP), 4-cloro-2-metilfenol (4C2MP) y 3-cloro-4-metilfenol (3C4MP). La oxidación de los isómeros tiene lugar a potenciales muy positivos, posteriores a 1.1 V. Se muestra que el cambio de posición en los sustituyentes puede modificar el potencial de oxidación entre los isómeros debido a efectos estéricos e inductivos. La detección electroanalítica de concentraciones del orden de micromoles, se realizó a través del método de adición de estándar externo y se encontró que la corriente mantiene una dependencia lineal con la concentración, lo cual permite su detección y posible cuantificación.

Palabras clave: Fenoles-clorados, electrooxidación, voltamperometría cíclica.



Abstract

Chloromethylphenols are aromatic compounds widely used as intermediates in the production of pesticides, disinfectants, resins, and other industrial chemicals. Their presence in water bodies and industrial effluents poses a significant environmental risk, as these compounds exhibit toxicity toward aquatic organisms and resistance to biological degradation. Understanding their degradation mechanisms and electron-transfer processes is essential for controlling and monitoring their occurrence in industrial effluents and wastewater. Identifying their oxidative transformation pathways is crucial for optimizing degradation strategies and minimizing the formation of toxic intermediates. The present work reports electroanalytical studies on the detection and electrooxidation of 4-chloro-3-methylphenol (4C3MP), 4-chloro-2-methylphenol (4C2MP), and 3-chloro-4-methylphenol (3C4MP). The oxidation of these isomers occurs at highly positive potentials, above 1.1 V. The results demonstrate that changes in the positions of the substituents can modify the oxidation potential among the isomers due to steric and inductive effects. Electroanalytical detection of micromolar concentrations was carried out using the external standard addition method, and the current was found to exhibit a linear dependence on concentration, enabling their detection and potential quantification.

Keywords: Chlorophenols, electrooxidation, cyclic voltammetry.

1. Introducción

Los clorometilfenoles son compuestos aromáticos ampliamente utilizados como intermediarios en la producción de pesticidas, desinfectantes, resinas y otros productos químicos industriales. Constituyen una familia importante de contaminantes orgánicos persistentes debido a su elevada toxicidad, estabilidad química, bioacumulación y presencia frecuente en matrices ambientales. Su presencia en cuerpos de agua y efluentes industriales, sedimentos y suelos, representa un riesgo ambiental significativo, ya que estos compuestos presentan toxicidad para los organismos acuáticos y resistencia a la degradación biológica. Su liberación al ambiente representa un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y la salud humana en general. La presencia del átomo de cloro en el anillo aromático incrementa la resistencia de estos compuestos a los procesos naturales de degradación, favoreciendo su persistencia y transporte ambiental. Comprender sus mecanismos de degradación y sus procesos de transferencia electrónica es fundamental para el control y monitoreo de su presencia en descargas industriales y corrientes de aguas residuales. Asimismo, la identificación de las rutas de transformación

oxidativa es crucial para optimizar las estrategias de degradación y minimizar la formación de intermediarios tóxicos (Biniak *et al.*, 2015). Entre los derivados de mayor interés ambiental se encuentran los metilclorofenoles, tales como el 4-cloro-3-metilfenol (4C3MP), 4-cloro-2-metilfenol (4C2MP) y 3-cloro-4-metilfenol (3C4MP). Estos compuestos combinan las características químicas del grupo fenólico y la sustitución clorada/metilada, lo que modifica sus propiedades ácido-base, lipofilicidad, potencial de oxidación y comportamiento electroquímico. Particularmente, los metilclorofenoles han sido identificados como contaminantes asociados a descargas industriales, formulaciones biocidas y procesos de transformación de compuestos clorados. Su detección a bajas concentraciones resulta esencial debido a que incluso con niveles traza pueden generar efectos tóxicos, incluyendo actividad mutagénica, alteraciones endocrinas y efectos adversos sobre organismos acuáticos (Yadav *et al.*, 2023). Los métodos convencionales para la determinación de clorofenoles, como la cromatografía de gases o líquida acoplada a detectores espectrométricos, ofrecen elevada sensibilidad y selectividad; no obstante, suelen requerir etapas complejas de



extracción, preconcentración, instrumentación costosa y personal especializado. En este contexto, las técnicas electroanalíticas han emergido como alternativas atractivas debido a su simplicidad operacional, bajo consumo de reactivos, capacidad de miniaturización y posibilidad de desarrollar dispositivos portátiles para monitoreo ambiental *in situ*. La respuesta electroquímica de los clorofenoles está principalmente asociada con la oxidación del grupo hidroxilo, proceso que involucra la transferencia acoplada de electrones y protones, generando intermediarios fenóxido/fenoxilo que pueden sufrir reacciones posteriores de acoplamiento, polimerización o ruptura del anillo aromático. La oxidación directa sobre electrodos convencionales suele estar limitada por la elevada sobretensión, sin embargo, en este trabajo los estudios se realizaron sobre un electrodo de carbón vítreo sin modificar para eliminar la influencia de la presencia de materiales en la sensibilidad, selectividad, límite de detección y estabilidad analítica. Más adelante se investigarán materiales catalíticos que mejoren los parámetros analíticos (Tian *et al.*, 2022). Además de su aplicación analítica, la electrooxidación de clorofenoles representa una estrategia prometedora para su eliminación ambiental debido a la posibilidad de transformar estos contaminantes en especies menos tóxicas o alcanzar su mineralización completa mediante procesos electroquímicos avanzados. La eficiencia de estos tratamientos depende fuertemente de la naturaleza del electrodo, las condiciones operacionales y la estructura molecular del contaminante. Estudios sobre electrooxidación de clorofenoles han demostrado que las características superficiales del material electrodico, incluyendo área específica, porosidad y propiedades catalíticas, influyen significativamente en la cinética de oxidación y en la formación de productos intermedios (Kamel *et al.*, 2024). A pesar de los avances alcanzados en la detección electroquímica de clorofenoles, la literatura

disponible se ha concentrado principalmente en compuestos como 4-clorofenol, 2,4-diclorofenol y pentaclorofenol, mientras que existe menor información sistemática sobre el comportamiento electroquímico individual de isómeros metilclorados como 4C3MP, 4C2MP y 3C4MP (Terashima *et al.*, 2022). La posición relativa de los sustituyentes cloro y metilo puede modificar la densidad electrónica del anillo aromático, la accesibilidad del grupo hidroxilo y la estabilidad de los intermediarios generados durante la oxidación, afectando tanto la respuesta analítica como la ruta de degradación electroquímica.

Por lo tanto, el desarrollo de metodologías electroanalíticas capaces de detectar selectivamente y estudiar la electrooxidación de 4C3MP, 4C2MP y 3C4MP representa un área de interés creciente dentro de la química ambiental y la electroquímica aplicada. En este trabajo se aborda el comportamiento voltamperométrico de estos tres isómeros, evaluando sus mecanismos de oxidación y explorando estrategias electroquímicas orientadas a mejorar su detección y posible eliminación mediante procesos de oxidación avanzada.

2. Metodología

2.1 Reactivos

Todos los reactivos empleados fueron de grado analítico y se utilizaron tal como se recibieron, sin purificación adicional. El 4-cloro-3-metilfenol (4C3MP), el 4-cloro-2-metilfenol (4C2MP) y el 3-cloro-4-metilfenol (3C4MP) fueron adquiridos de Sigma-Aldrich. Como electrolito se utilizó 0.1 M de perclorato de tetrabutilamonio (TBAP, Sigma-Aldrich®) en acetonitrilo (ACN), ambos fueron obtenidos con proveedores comerciales. Todas las soluciones se prepararon con agua desionizada (Milli-Q) justo antes de cada experimento. Las disoluciones de concentraciones bajas se prepararon por dilución a partir de una solución madre y se empleó el método de adición del estándar externo para preparar las curvas de calibración.



2.2 Estudios electroquímicos

Los estudios electroquímicos se llevaron a cabo utilizando un potenciostato-galvanostato Gamry (Reference 3000). Los experimentos se realizaron en una celda electroquímica convencional de tres electrodos, empleando un electrodo de carbono vítreo (GC) sin modificar como electrodo de trabajo. Como contraelectrodo se utilizó un alambre de platino enrollado en espiral, mientras que un electrodo de Ag/AgCl saturado se empleó como electrodo de referencia.

3. Resultados y discusión

El comportamiento electroquímico de los tres clorofenoles estudiados; 4-cloro-3-metilfenol (4C3MP), 4-cloro-2-metilfenol (4C2MP) y 3-cloro-4-metilfenol (3C4MP), se realizó empleando voltamperometría cíclica a una velocidad de barrido de $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$. La electrooxidación de los tres clorofenoles a una concentración de 1 mM, ocurre a potenciales altamente positivos, por arriba de 1.1 V, sugiriendo que la oxidación necesita un gran sobrepotencial tal y como se muestra en la **Figura 1**. En todas las moléculas, el grupo hidroxilo (-OH) constituye el grupo funcional que se oxida con mayor facilidad. Debido al efecto donador de electrones por resonancia del grupo -OH, el anillo fenólico se encuentra altamente activado, lo que hace que el anillo aromático sea más susceptible al ataque electrofílico y a la degradación oxidativa que el grupo metilo (-CH₃). El par de electrones no compartidos del átomo de oxígeno del grupo -OH se deslocaliza hacia el anillo aromático, incrementando la densidad electrónica en las posiciones orto y para y facilitando su rápida oxidación para formar quinonas o hidroxiquinonas. En contraste, el grupo metilo unido al anillo aromático puede oxidarse hasta un grupo ácido carboxílico; sin embargo, este proceso requiere una energía de disociación elevada para romper los enlaces C(sp³)-H. Además, la posición del grupo metilo en el anillo aromático al parecer introduce efectos estéricos especialmente en el 4Cl-3MP, en donde se observan sólo dos señales de

oxidación. Cuando la distancia entre el grupo cloro y metilo es más lejana, entonces se alcanzan a registrar tres señales de oxidación separadas. Lo que indica que el efecto estérico es más fuerte que la electronegatividad del cloro en la separación de las señales de oxidación, pero más débil en cuanto a la velocidad de la reacción que podemos correlacionar con la corriente generada durante la electrooxidación, como se puede observar en la **Figura 1**. La posición del cloro en el anillo aromático también juega un papel muy importante; un cambio de la posición 3 a la posición 4 en el anillo aromático, permite separar dos señales de oxidación para la posición 4, en comparación con la posición 3, la cual sólo despliega una señal de oxidación debido al efecto electronegativo del cloro. A partir del comportamiento voltamperométrico se puede deducir que las reacciones electroquímicas de los tres clorofenoles, en electrodos de carbono vítreo, son irreversibles.

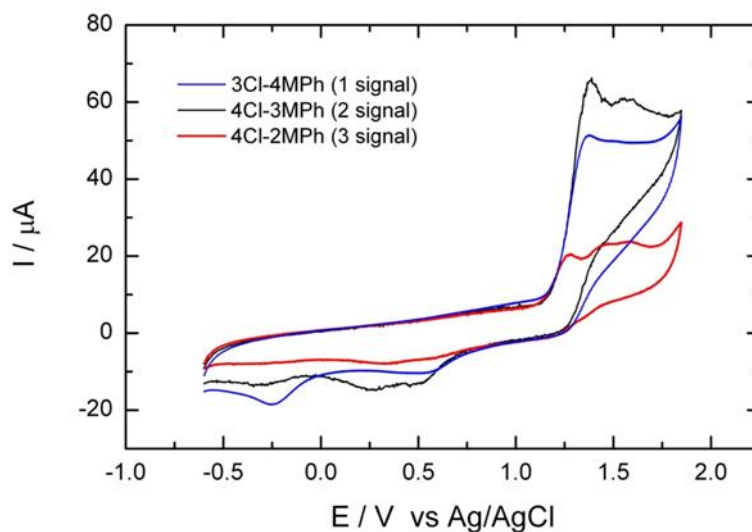


Figura 1. Voltamperometría cíclica en presencia de 1 mM de los clorofenoles 3Cl-4MPH, 4Cl-3MPH, 4Cl-2MPH en electrolito 0.1 M TBAP en ACN empleando un electrodo de GC a una velocidad de barrido de 100 mV·s⁻¹.

La oxidación de los clorofenoles se estudió a diferentes concentraciones empleando electrodos de carbón vítreo. En el caso del 3C4MP, la respuesta voltamperométrica muestra un incremento de la corriente después de 1.1 V y un pico de oxidación en aproximadamente 1.32 V. A pesar de observar sólo una señal de oxidación bien definida, se observan dos señales de reducción muy débiles a concentraciones altas, en aproximadamente 0.58 V y -0.22 V. El comportamiento electroquímico observado evidencia un proceso de oxidación dependiente de la concentración. Esta respuesta observada, corresponde a la oxidación electroquímica del grupo fenólico presente en la molécula. Los compuestos fenólicos son conocidos por presentar procesos de oxidación asociados con la formación de radicales fenóxido, mediante una transferencia electrónica acoplada a la pérdida de protones: $\text{ArOH} \rightarrow \text{ArO}^\bullet + \text{H}^+ + \text{e}^-$ donde ArOH representa al 3-cloro-4-metilfenol. La presencia del sustituyente cloro y del grupo metilo modifica la densidad electrónica del anillo aromático, afectando la facilidad de oxidación del grupo hidroxilo fenólico y desplazando el potencial de oxidación hacia valores relativamente elevados.

El análisis de los perfiles voltamperométricos indica que la oxidación del 3Cl-4MPH es un proceso predominantemente irreversible, debido a la ausencia de un pico catódico equivalente durante el barrido inverso. Este comportamiento es característico de los fenoles, donde el radical fenóxido generado en la primera etapa electroquímica experimenta rápidamente reacciones químicas posteriores, tales como acoplamiento radicalario, formación de productos oligoméricos o transformación de especies oxidadas más estables. Por lo tanto, el sistema puede describirse mediante un mecanismo electroquímico-químico consecutivo (EC), en el cual la transferencia electrónica inicial está seguida por una reacción química irreversible. Según Terashima y col. (2022), los principales productos de oxidación de los fenoles son dos productos; la p-benzoquinona y la o-benzoquinona. Por su parte, los fenoles clorados son más resistentes a la oxidación según Rodgers y col., y al estar en contacto con la benzoquinona se esperaría que se forme una benzoquinona clorada como el principal producto de oxidación que muy probablemente, es irreversible. La pequeña respuesta observada en la región catódica a potenciales negativos puede atribuirse a



procesos secundarios, tales como la reducción de especies generadas durante el barrido anódico, trazas de oxígeno disuelto o contribuciones asociadas al electrolito soporte. Sin embargo, debido a su baja intensidad y limitada dependencia con la concentración del analito, esta señal no representa el proceso electroquímico predominante del sistema. Para la identificación de los productos de oxidación, actualmente se llevan a cabo experimentos de electrolisis a potencial controlado y posteriormente se realizará espectroscopia infrarroja.

El incremento de la corriente de oxidación con la concentración del 3C4MP, demuestra que la respuesta electroquímica está directamente relacionada con la cantidad disponible en la interfase electrodo/disolución. La relación lineal entre la corriente del pico anódico y la concentración (recuadro, **Figura 2**) presenta una excelente linealidad en el intervalo estudiado, con una ecuación de calibración: $I_p = 0,06897 + 0,02621C$ y un coeficiente de correlación $R=0,99874$. Este elevado valor de

correlación confirma una relación proporcional entre la señal electroquímica y la concentración del compuesto, indicando que el electrodo de carbono vítreo presenta una adecuada sensibilidad y reproducibilidad para la detección de 3Cl-4MPH en medio orgánico. La pendiente de calibración ($0.02621 \mu A \cdot \mu M^{-1}$) representa la sensibilidad del sistema y evidencia una respuesta analítica favorable dentro del intervalo de concentraciones evaluado.

La ausencia de desplazamientos significativos del potencial de oxidación con el incremento de concentración sugiere que el mecanismo de transferencia electrónica permanece constante y que no se producen cambios importantes en la naturaleza de la especie electroactiva durante el proceso. Asimismo, el incremento continuo de la corriente indica que, bajo estas condiciones experimentales, el transporte de masa del analito hacia la superficie del electrodo juega un papel importante en la magnitud de la señal registrada.

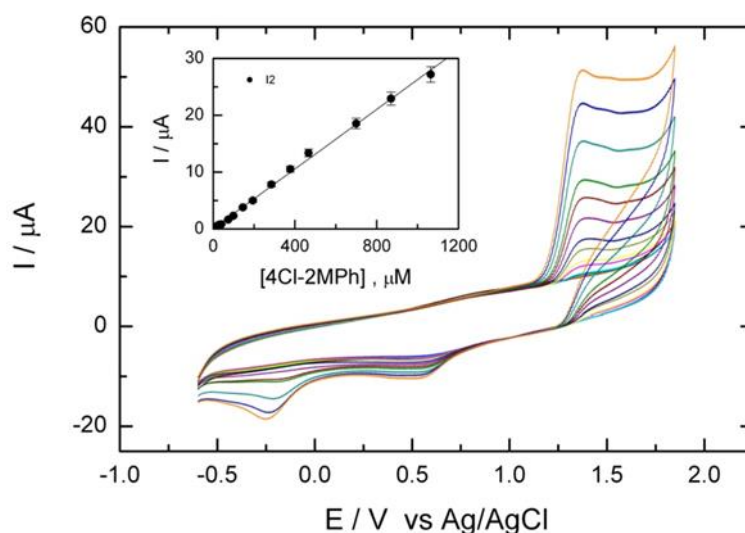


Figura 2. Respuesta voltamperométrica a diferentes concentraciones del 3-cloro-4-metilfenol empleando un electrodo de GC en 0.1 M de TBAP en ACN a una velocidad de barrido de $100 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$.

Un cambio en la posición del cloro de la meta a la posición para, y del grupo metilo de la posición para a la posición meta, cambia la respuesta voltamperométrica de los clorofenoles. Los voltamperogramas

cíclicos del 4C3MP muestran dos procesos anódicos irreversibles de oxidación muy bien definidos en 1.38 y 1.58 V respectivamente vs. Ag/AgCl, sobre un electrodo de carbón vítreo. Al revertir el



barrido de potencial, y a concentraciones a partir de $600\ \mu\text{M}$, se registraron tres señales de reducción muy débiles en magnitud comparadas con las de oxidación. La ausencia de señales catódicas a bajas concentraciones durante el barrido inverso confirma que los productos generados en la primera transferencia electrónica experimentan reacciones químicas rápidas, impidiendo su reducción dentro de la escala temporal del experimento. Las corrientes de ambos procesos aumentan linealmente con la concentración del analito, sin desplazamientos apreciables en los potenciales de oxidación, lo que indica que el mecanismo electroquímico permanece inalterado en todo el intervalo de concentraciones estudiado. Al estar en posición meta, los efectos electrónicos y estéricos del metilo son menores con respecto al fenol, y el cloro al encontrarse más alejado del grupo fenólico (ahora en posición para), afectaría menos a su electronegatividad, lo que permitiría separar dos señales de oxidación y además facilitar la reacción incrementando su velocidad como se infiere por el aumento en la corriente.

La respuesta voltamperométrica registrada a diferentes concentraciones para el 4-cloro-

3-metilfenol muestra una respuesta en corriente al menos dos veces mayor que el 3-cloro-4-metilfenol, con una sensibilidad de $0.07243\ \mu\text{A}/\mu\text{M}$ y $0.06645\ \mu\text{A}/\mu\text{M}$ respectivamente (recuadro **Figura 3**). Los coeficientes de correlación superiores a 0.999 demuestran una excelente respuesta analítica, mientras que la mayor pendiente obtenida para el primer proceso sugiere que éste constituye la señal más adecuada para la cuantificación electroanalítica.

Un cambio del grupo metilo a la posición orto, permite definir tres señales de oxidación anódica irreversibles en 1.23 V, 1.42 V y 1.58 V respectivamente, para el 4-cloro-2-metilfenol (**Figura 4**). La ausencia de picos catódicos durante el barrido inverso de potencial, indica que los productos generados en la oxidación primaria experimentan reacciones químicas rápidas, impidiendo su reducción en la escala temporal del experimento. La posición orto, meta, para pueden definir la estabilización del radical fenoxi mediante resonancia. Al estar el grupo metilo en posición orto con respecto al fenol, éste sufre un mayor impedimento estérico e incluso el grupo metilo podía modificar el pKa local de la molécula.

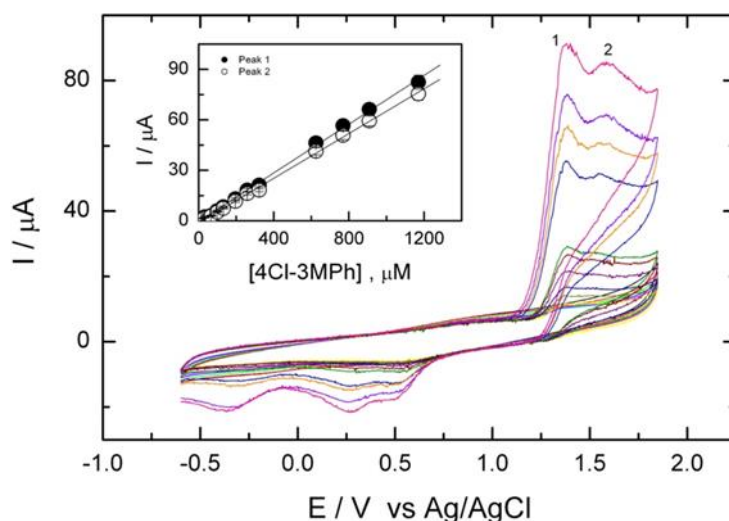


Figura 3. Respuesta voltamperométrica a diferentes concentraciones de 4-cloro-3-metilfenol empleando 0.1 M TBAP como electrolito en ACN, usando un electrodo GC a $100\ \text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$.

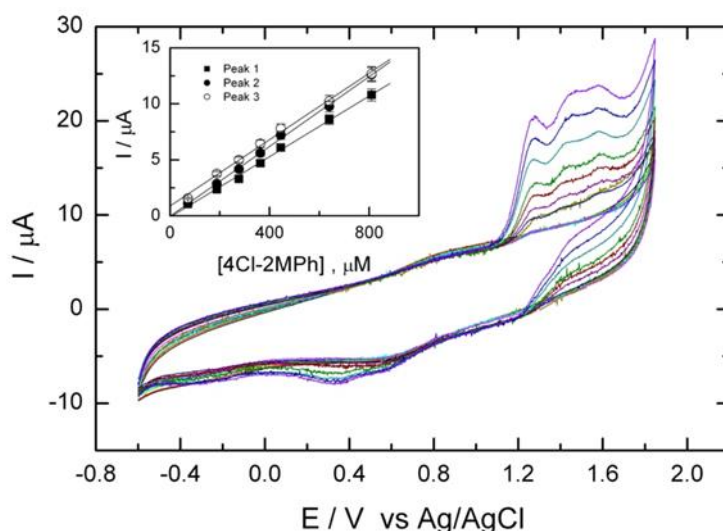


Figura 4. Voltamperometría cíclica a diferentes concentraciones de 4-cloro-2-metilfenol en 0.1 M TBAP en ACN empleando un electrodo GC a $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$.

Las corrientes de los tres procesos anódicos aumentan linealmente con la concentración del analito, mientras que los potenciales de oxidación permanecen prácticamente constantes, lo que sugiere que el mecanismo de transferencia electrónica no se modifica dentro del intervalo de concentraciones estudiado. La presencia de múltiples ondas de oxidación es consistente con un mecanismo de oxidación en varias etapas, que involucra probablemente la formación inicial de un radical fenoxi, seguida de oxidaciones adicionales que podrían conducir a especies tipo quinona y/o productos de acoplamiento oxidativo. La excelente linealidad observada para los tres procesos ($R > 0.998$) demuestra que la respuesta electroquímica del sistema es adecuada para la detección y eventual cuantificación electroanalítica del 4-cloro-2-metilfenol.

Es interesante notar que el tercer pico anódico presenta una pendiente ligeramente menor ($0.01483 \mu\text{A}\cdot\mu\text{M}^{-1}$) que el segundo ($0.01558 \mu\text{A}\cdot\mu\text{M}^{-1}$), mientras que el primero es el de menor sensibilidad ($0.01352 \mu\text{A}\cdot\mu\text{M}^{-1}$). Esto podría indicar que el segundo proceso de oxidación es el más sensible para fines analíticos. El comportamiento electroquímico del 4-cloro-2-metilfenol, esta enormemente influenciado por los sustituyentes $-\text{Cl}$ y $-\text{CH}_3$ y su posición en el anillo aromático, los

cuales modifican la estabilidad de los intermediarios oxidativos, favoreciendo la formación de especies sucesivas con potenciales de oxidación diferente. Este comportamiento apunta a un mecanismo de oxidación en múltiples etapas, y no a tres oxidaciones independientes.

En comparación con el 4-cloro-2-metilfenol, el 4-cloro-3-metilfenol presenta corrientes significativamente mayores y únicamente dos ondas de oxidación bien definidas, lo que pone de manifiesto que la posición relativa de los sustituyentes modifica la cinética y la secuencia de las etapas oxidativas, probablemente debido a cambios en los efectos estéricos y electrónicos que estabilizan los intermediarios generados durante la electrooxidación.

El mecanismo por el cual la reacción de oxidación se mantiene, fue estudiado a través de la dependencia de la corriente con la raíz cuadrada de la velocidad de barrido. Como ejemplo representativo de los tres clorofenoles estudiados, la **Figura 5** muestra los voltamperogramas cíclicos del 4-cloro-3-metilfenol registrados a diferentes velocidades de barrido, los cuales muestran un incremento progresivo de las corrientes de pico anódico (I_{pa}) y catódico (I_{pc}) conforme aumenta la velocidad de barrido. Como se muestra en el recuadro de la **Figura 5**, se presentó una relación lineal con elevados coeficientes de correlación



($R > 0.99$), lo que indica que el transporte de masa del analito hacia y desde la superficie del electrodo está gobernado principalmente por difusión. Este comportamiento concuerda con la ecuación de Randles-Sevcik y sugiere que el proceso electroquímico del 4-cloro-3-metilfenol no está controlado por fenómenos de adsorción

superficial, sino por la difusión de la especie electroactiva desde el seno de la solución hacia la interfaz electrodo-solución. El mismo comportamiento se observó en el caso de 3C4MP y del 4C2MP todos en presencia de 1 mM del correspondiente clorofenol.

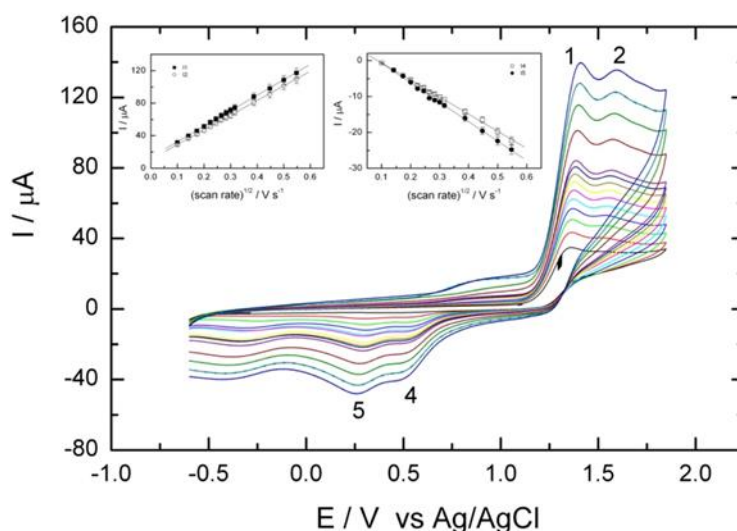


Figura 5. Voltamperogramas cíclicos a diferentes velocidades de barrido en presencia de 1 mM de 4-cloro-3-metilfenol en 0.1 M TBAP en ACN empleando un electrodo de carbón vítreo. Recuadro: Relación lineal de Randles-Sevcik, para las señales de oxidación y reducción correspondientes a los picos 1,2 y 4,5.

4. Reflexiones finales y/o conclusiones

Los estudios electroquímicos realizados sobre los isómeros clorometilfenólicos 3-cloro-4-metilfenol (3C4MP), 4-cloro-3-metilfenol (4C3MP) y 4-cloro-2-metilfenol (4C2MP) evidenciaron que la posición relativa de los sustituyentes metilo y cloro en el anillo aromático influye de manera significativa en el mecanismo de oxidación electroquímica. En particular, el 3C4MP presentó un único pico de oxidación, el 4C3MP mostró dos picos bien definidos y el 4C2MP exhibió tres procesos de oxidación, lo que sugiere una complejidad creciente de las etapas de transferencia electrónica y de las transformaciones químicas asociadas conforme cambia la disposición de los sustituyentes. El hecho de observar diferentes señales electroquímicas, y dependencias lineales entre la corriente de pico y la concentración estudiada para los diferentes isómeros, muestra el potencial de

la metodología electroquímica empleada para realizar análisis cualitativo y cuantitativo de los clorometilfenoles.

Asimismo, las relaciones lineales observadas entre la corriente de pico y la raíz cuadrada de la velocidad de barrido, de acuerdo con la ecuación de Randles-Sevcik, indican que los procesos de oxidación están controlados predominantemente por difusión. La ausencia de desviaciones significativas respecto a este comportamiento respalda la reproducibilidad de la respuesta electroquímica y la validez del modelo difusional para describir el transporte de masa en las condiciones experimentales utilizadas.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que la posición de los grupos cloro y metilo no solo modifica el perfil voltamétrico de los compuestos, sino también la secuencia de los procesos de oxidación involucrados, manteniéndose, no



obstante, un régimen de transporte controlado por difusión y una respuesta analítica lineal. Estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión del efecto de la estructura molecular sobre el comportamiento electroquímico de los clorometilfenoles y constituyen una base para el desarrollo de metodologías electroanalíticas orientadas a su identificación y cuantificación.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por VIEP-BUAP, Proyecto: 00802-PV/2026.

Contribución de los autores: Conceptualización, E.A.C.J. y R.A.S.; metodología, I.Y.R.R., S.C.L. y R.A.S.; investigación, I.Y.R.R. y S.C.L.; validación, E.A.C.J. y R.A.S.; curación de datos, R.A.S.; redacción, R.A.S.; adquisición de fondos, E.A.C.J. y R.A.S. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

Referencias

Biniak, S.; Pakuła, M.; Świątkowski, A.; Kuśmirek, K.; Trykowski, G. (2015). Electro-oxidation of chlorophenols on powdered carbon electrodes of different porosity. *Reac. Kinet. Mech. Cat.* 114, 369–383. doi 10.1007/s11144-014-0797-9

Kamel, A. H.; Abd-Rabboh, H. S. M. (2024). Electrochemical sensors based on molecularly imprinted polymers for the detection of chlorophenols as emerging distributing chemicals: a review. *Anal. Met.* 16, 4024–4040. doi: 10.1039/d4ay00386a

Kamel, A. H.; Abd-Rabboh, H. S. M.; Hefnawy, A. (2024). Molecularly imprinted polymer-based electrochemical sensors for monitoring the persistent organic pollutants chlorophenols. *RSC Adv.* 14, 20163–20181. doi: 10.1039/d4ra03095h

Rodgers, J. D.; Jedral, W.; Bunce, N.J. (1999). Electrochemical Oxidation of Chlorinated Phenols. *Environ. Sci. Technol.* 33, 1453–1457. doi.org/10.1021/es9808189

Tian, Q.; Chen, S.; Yu, J.; Zhang, M.; Gao, N.; Yang, X.; Wang, C.; Duan, X.; Zang, L. (2022). Tunable construction of electrochemical sensors for chlorophenol detection. *Journal of Materials Chemistry C.* 10, 10171–10195. doi: 10.1039/d2tc01369j

Terashima C.; Rao T.N.; Sarada B.V.; Tryk D.A.; Fujishima A. (2002). Electrochemical Oxidation of Chlorophenols at a Boron-Doped Diamond Electrode and Their Determination by High-Performance Liquid Chromatography with Amperometric Detection. *Anal. Chem.* 74, 895-902. doi.org/10.1021/ac010681w

Yadav, S.; Kumar, S.; Haritash, A. K. (2023). A comprehensive review of chlorophenols: Fate, toxicology and its treatment. *J. Environ. Man.* 342, 118254. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118254