Estudio del electrodepósito de plata sobre materiales de carbón en medio neutro

Study of silver electrodeposition on carbon materials in a neutral medium

Garrido-González, Josseline [a], Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín * [b], Sierra-Grajeda, Juan Manuel Tadeo [c] y Mandujano-Ramírez, Humberto Julián [d]

[a] Universidad Autónoma del Carmen • MHR-6004-2025 • 0009-0001-9797-2345 • 139068
[b] Universidad Autónoma del Carmen • AIB-1429-2022 • 0000-0003-1368-1741 • 164797
[c] Universidad Autónoma del Carmen • LSK-8588-2024 • 0000-0002-0565-6450 • 219284
[d] Universidad Autónoma del Carmen • LTC-9972-2024 • 0000-0003-3714-5564 • 266189

Clasificación:

DOI: https://doi.org/10.35429/H.2025.1.98.105

Área: Ingeniería
Campo: Ingeniería
Disciplina: Ingeniería química
Subdisciplina: Química orgánica

Key Handbooks

El siguiente trabajo presenta el estudio del electrodepósito de plata sobre materiales de carbono en medio neutro. El objetivo de este estudio es determinar el intervalo de potencial en el cual la plata es depositada sobre carbón vitreo y una película de vulcan mediante voltamperometría cíclica de potenciales de inversión y estudiar el efecto con la velocidad de barrido. Cabe mencionar que este trabajo contribuirá a la elaboración de electrocatalizadores que servirán para la reducción electroquímica del CO_2 por sus propiedades catalíticas. La autora Garrido-González cuenta con beca SECIHTI y el resto de los autores cuentan con perfil deseable PRODEP y pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Tres autores son procedentes de la Universidad Autónoma del Carmen [Institución Pública Estatal] y un autor de la Universidad autónoma de Campeche [Institución Pública Estatal]. Las palabras claves más empleadas son: electrodepósito, plata, voltamperometría y carbón.

Área: Difusión y acceso universal a la ciencia

Citación: Garrido-González, Josseline, Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín, Sierra-Grajeda, Juan Manuel Tadeo y Mandujano-Ramírez, Humberto Julián. 2025. Estudio del electrodepósito de plata sobre materiales de carbón en medio neutro. 98-105. ECORFAN.

* ✉ [sfigueroa@pampano.unacar.mx]

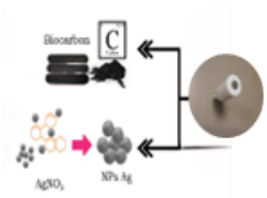
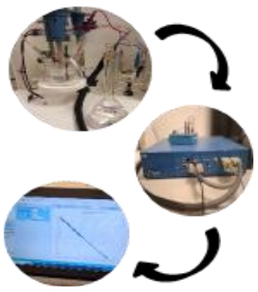
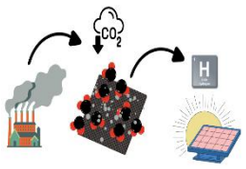
Handbook shelf URL: https://www.ecorfan.org/handbooks.php

ISBN 978-607-8948-59-8 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HCMPDS. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.

Abstract

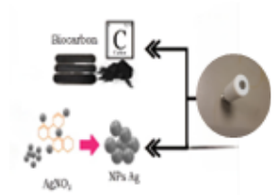
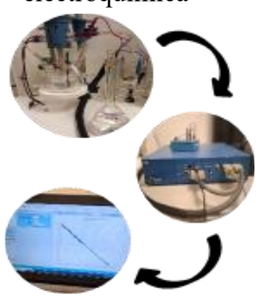
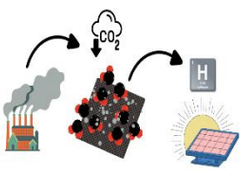
This study analyzes how the morphology of two types of carbon, vitreous carbon [smooth surface] and volcanic carbon [porous surface], influences the electrodeposition of silver, used as an electrocatalyst in the electrochemical reduction of CO_2. Due to the formation of byproducts, a conductive support is required to maintain the catalytic efficiency of silver. Cyclic voltammetry was used to evaluate the process, observing that silver is deposited between 0.4 V and 0.2 V vs. Calomel sat., with slight variations depending on the material. The reduction of Ag[I] ions is controlled by diffusion, regardless of the electrode surface.

Study of silver electrodeposition on carbon materials in neutral medium		
Objetive	**Methodology**	**Contribution**
Electrode preparation 	Electrochemical characterization 	Application as supports for $ERCO_2$ 

Electrodeposit, Ag, carbon

Resumen

En este estudio se analiza como la morfología de dos tipos de carbón, carbón vítreo [superficie lisa] y carbón vulcan [superficie porosa], influye en el electrodepósito de plata, usada como electrocatalizador en la reducción electroquímica del CO_2. Debido a la formación de subproductos, se requiere un soporte conductor para mantener la eficiencia catalítica de la plata. Se utilizó voltamperometría cíclica para evaluar el proceso, observando que la plata se deposita entre 0.4 V y 0.2 V vs Calomel sat., con ligeras variaciones según el material. La reducción de ion Ag[I] está controlada por la difusión, sin depender de la superficie del electrodo.

Estudio del electrodepósito de plata sobre materiales de carbón en medios neutros		
Objetivo	**Metodología**	**Contribución**
Preparación del electrodo 	Caracterización electroquímica 	Aplicación como soporte para $ERCO_2$ 

Electrodepósito, Ag, carbón

Introducción

El uso de la plata [Ag] como electrocatalizador ha tenido un creciente interés en diversos campos de la electroquímica [Elattar et al., 2024] debido a sus propiedades únicas, como su alta conductividad eléctrica, excelente estabilidad y su relativa abundancia en comparación con otros metales nobles [Bouafia et al., 2021][Beck, Loessl, & Baeumner, 2023]. La plata ha demostrado ser particularmente efectiva en reacciones electroquímicas clave, como la reducción de oxígeno [Linge et al., 2018][Guo, Hsu, Chu, & Chen, 2010] y la electroreducción de dióxido de carbono [Li et al., 2023], lo que la convierte en un material prometedor para aplicaciones en celdas de combustible, baterías y sistemas de almacenamiento de energías renovables [Zan et al., 2022]. En este contexto, el tipo de sustrato o soporte sobre el cual se deposita la plata juega un papel fundamental en la actividad catalítica del material. Las películas de carbón, debido a su alta conductividad y estabilidad química, son materiales ampliamente utilizados como soportes en procesos de electrocatálisis [Liu et al., 2022][Truong, Yang, & Yang, 2019]. Sin embargo, el comportamiento electrocatalítico de la plata puede verse significativamente afectado por el tipo de película de carbón utilizada. Diferentes materiales como el carbón vítreo, el grafeno y los nanotubos de carbono presentan variaciones en su estructura y propiedades que pueden influir en la distribución, adherencia y eficiencia del electrodepósito de plata [Luo, Fu, Yin, & Lin, 2022][Vega-Cartagena et al., 2021]. En este trabajo, se propone el uso de materiales de carbón como soportes de partículas de Ag y evaluar su comportamiento electroquímico, este enfoque busca optimizar el desempeño catalítico de Ag. La investigación incluye caracterización morfológica de los carbones mediante SEM y su evaluación electroquímica, explorando su capacidad para ser soportes de partículas metálicas. Los resultados obtenidos podrían abrir nuevas perspectivas en el desarrollo de catalizadores y sus aplicaciones en el ámbito ambiental.

Metodología

Preparación de los electrodos

En este estudio se evaluaron dos electrodos de carbón con diferente morfología. El primero fue polvo de carbón vulcan XC-72 con un área superficial total [BET] 254 m^2/g y tamaño de partícula de 30 a 60 nm obtenido de manera comercial suministrado por la Química Rana y el segundo electrodo fue una barra de carbón vitreo [CV] con área geométrica de 0.168 cm^2.

Para el primer electrodo se preparó una tinta catalítica que contenía 32 mg de polvo de carbón vulcan, 1.28 mL de alcohol isopropílico y 0.32 mL de nafion líquido [5 wt% Sigma-Aldrich], posteriormente se sometieron en agitación ultrasónica durante 30 minutos hasta obtener una tinta homogénea. La película de carbón vulcan se soportó sobre el electrodo de carbón vítreo [área geométrica 0.168 cm^2] agregando 10 µL de tinta de carbón y posteriormente se dejó secar durante 2 minutos a temperatura ambiente. Para el caso del electrodo de CV, se desbasto la superficie con diferentes lijas, después con un paño con alúmina se pulió para darle acabado espejo y finalmente se limpió con agua desionizada y acetona.

Caracterización de los electrodos de carbón mediante Microscopia Electrónica de Barrido [SEM]

Los electrodos de carbón se analizaron mediante un microscopio electrónico de barrido [SEM] de alta resolución FE SEM Hitachi S-5500 a diferentes magnitudes para conocer la morfología mediante un haz de electrones de campo.

Caracterización electroquímica de las películas de carbón

Se empleó una celda electroquímica típica de tres electrodos como electrodo auxiliar una barra de grafito, como electrodo de referencia un electrodo de calomel saturado y como electrodo de trabajo la película de carbón Vulcan y el carbón vítreo Se empleó el sistema electrolítico 0.01 M $AgNO_3$, 0.1 M KNO_3 a pH=7. Las películas de carbón se evaluaron mediante voltamperometría cíclica a diferentes velocidades de barrido [10, 20, 30, 50, 70 y 100 mV/s] y potenciales de inversión en intervalos de 0.4 V a 1 V y –0.1 V a 1 V. Todas las pruebas se realizaron en el potenciostato/galvanostato BioLogic® y la adquisición y tratamiento de las respuestas voltamperométricas se obtuvieron mediante el software Ec-Lab® V.10.38. Así mismo, los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente y en atmósfera de nitrógeno. El electrolito fue preparado con agua desionizada [ultrapure Mili-Q], burbujeada previamente durante 10 minutos con nitrógeno y todas las sales utilizadas son de grado reactivo.

Resultados

Caracterización de la superficie de los electrodos de carbón mediante Microscopia Electrónica de Barrido [SEM]

En la figura 1 se muestran imágenes SEM correspondientes al electrodo de carbón vítreo [CV] y la película de carbón vulcan a 0.5 kV, 5.0 KV, respectivamente. Como se puede observar ambos materiales presentan diferentes morfologías, el carbón vítreo exhibe una superficie lisa, mientras que la película vulcan presenta aglomerados de tamaño homogéneo.

Box 1

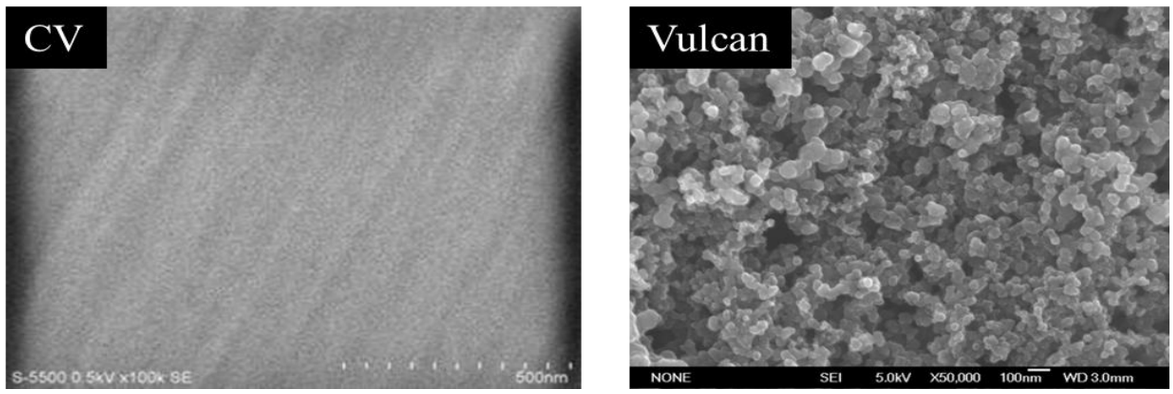


Figura 1

Imágenes de SEM del electrodo de carbón vítreo [CV] y la película de carbón vulcan.

Fuente: Elaboración propia.

Estudio del electrodepósito de Ag mediante voltamperometría cíclica de potenciales de inversión [E□]

Para determinar el intervalo de potencial dónde se deposita la plata sobre los electrodos de carbono, se realiza un estudio de voltamperometría de potenciales de inversión [E□] en el intervalo de potencial de 0.9 V □ E□ □ -0.1 V vs Calomel sat. KCl. En la Figura 2 se comparan las respuestas voltamperométricas obtenidas sobre el soporte de carbón vítreo [CV] y la película de carbón de vulcan en el intervalo de potencial de potencial 0.4 V □ E□ □ 0.9 V vs. Calomel sat. KCl en un electrolito de 0.01 M $AgNO_3$, 0.1 M KNO_3 a pH=7 y 20 mV/s. En todos los casos, se inició el barrido de potencial en sentido negativo con respecto al potencial de circuito abierto [Eocp]. En ambos electrodos se observa una respuesta capacitiva, además se observan corrientes ligeramente más grandes sobre la película de vulcan, esto debido a la superficie porosa, alcanzando corrientes catódicas de -3.41×10^{-3} mA y corrientes anódicas de 1.21×10^{-2} mA. Cabe mencionar que en este intervalo de potencial no se describe ningún proceso farádaico.

Box 2

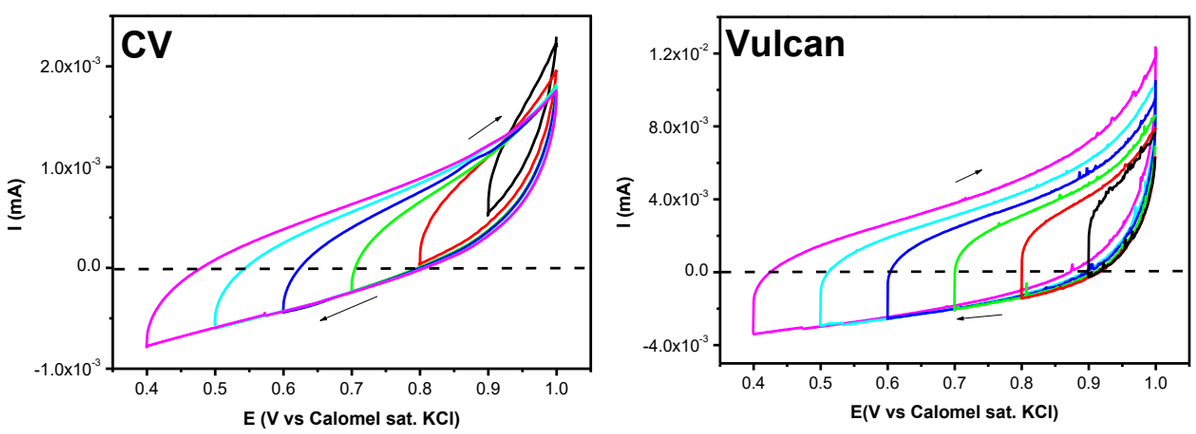


Figura 2

Voltamperogramas de potenciales de inmersión obtenidos sobre el electrodo CV y la película de carbón vulcan [indicadas en la figura] correspondiente al intervalo 0.4 V≤E≤0.9 V vs Calomel sat. KCl, en el sistema 0.01 M $AgNO_3$, 0.1 M KNO_3 a pH=7, 20 mV/s.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3 se muestran las respuestas voltamperométricas en el intervalo 0.3V≤E≤-0.1 V vs Calomel Sat. KCl. En ambos electrodos, se describe un potencial de pico catódico [Epc] asociado al proceso de reducción de plata [Ag^+ a Ag] y al invertir el potencial se observa el potencial de pico anódico [Epa] correspondiente a la oxidación de la plata depositada previamente [ecuación 1]. Para la película vulcan y el electrodo de CV se describe un potencial de sobrecruce [Ec] asociado a un proceso de electrocristalización con valores de 0.4032 V y el 0.3849 V, respectivamente.

$$Ag^+ + e^- \leftrightarrow Ag \qquad [1]$$

Considerando la reacción 1 y mediante la ecuación de Nernst, se puede conocer teóricamente el potencial termodinámico [E] que se asocia con el potencial estándar [E°], el cual se describe mediante la siguiente ecuación:

$$E = E^\circ_{Ag^+/Ag} + \frac{RT}{nF}\log\,[Ag^+] \qquad [2]$$

Considerando el $E^\circ_{Ag^+/Ag} = 0.7996\ V\ vs\ SHE$ o $E^\circ_{Ag^+/Ag} = 0.5386\ V\ vs\ Calomel\ Sat.KCl$ y la $[Ag^+]$= 0.01 M, teóricamente el E es 0.4386 V vs Calomel sat. KCl. Comparando los valores de la figura 3 con este el E, se observan valores muy cercanos, esto posiblemente se deba a la morfología del material de carbón.

Box 3

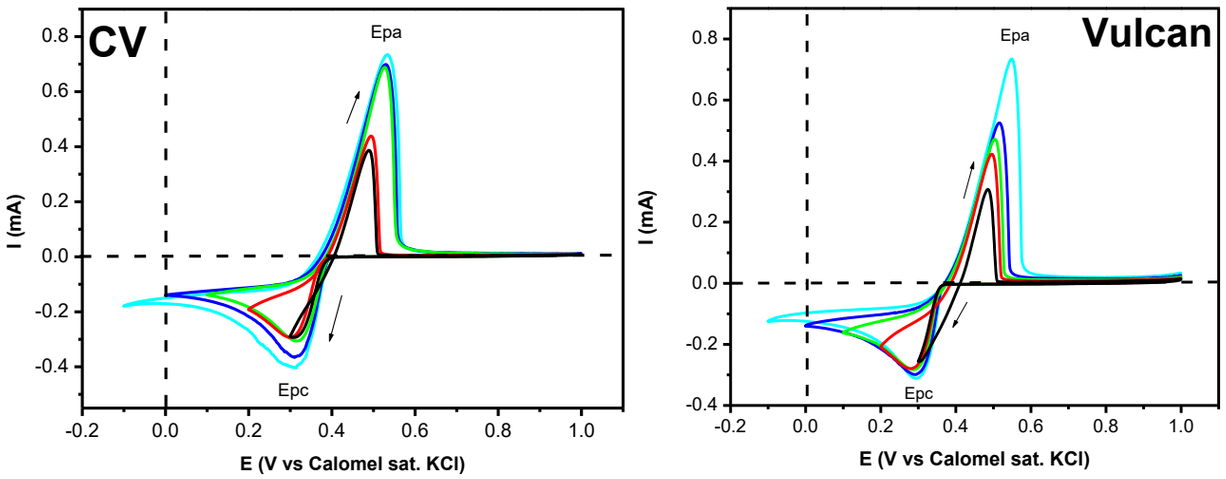


Figura 3

Voltamperogramas de potenciales de inmersión obtenidos sobre el electrodo CV y la película de carbón vulcan [indicadas en la figura] correspondiente al intervalo 0.3 V≤E≤-0.1 V vs Calomel sat. KCl, en el sistema 0.01 M $AgNO_3$, 0.1 M KNO_3 a pH=7, 20 mV/s.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando las respuestas de la figura 3, se determinó que el intervalo de potencial dónde se deposita la plata es de 0.38 V a -0.01 V.

Box 4

Tabla 1

Valores de potencial de pico anódico [Epa] y catódico [Epc] obtenidos de la ventana de potencial de –0.1 V a 1 V.

Electrodos	Epc [V]	Epa [V]	Intervalo de reducción [V]
CV	0.31	0.53	0.38 a -0.01
Película vulcan	0.29	0.54	0.35 a -0.01

Fuente: Elaboración propia

Efecto de la velocidad de barrido

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de los electrodos se realiza un estudio de voltamperometría cíclica a diferentes velocidades de barrido. En la figura 4 se muestran las respuestas voltamperométricas obtenidas sobre el electrodo de carbón vítreo y la película de carbón vulcan en un electrolito de 0.01 M $AgNO_3$, 0.1 M KNO_3 a pH=7 a 10, 20, 30, 50, 70 y 100 mV/s. En los dos casos, se observan los picos de reducción y oxidación de la plata, las corrientes aumentan en función de la velocidad de barrido, así mismo los valores de corriente dependen del tipo de material.

Box 5

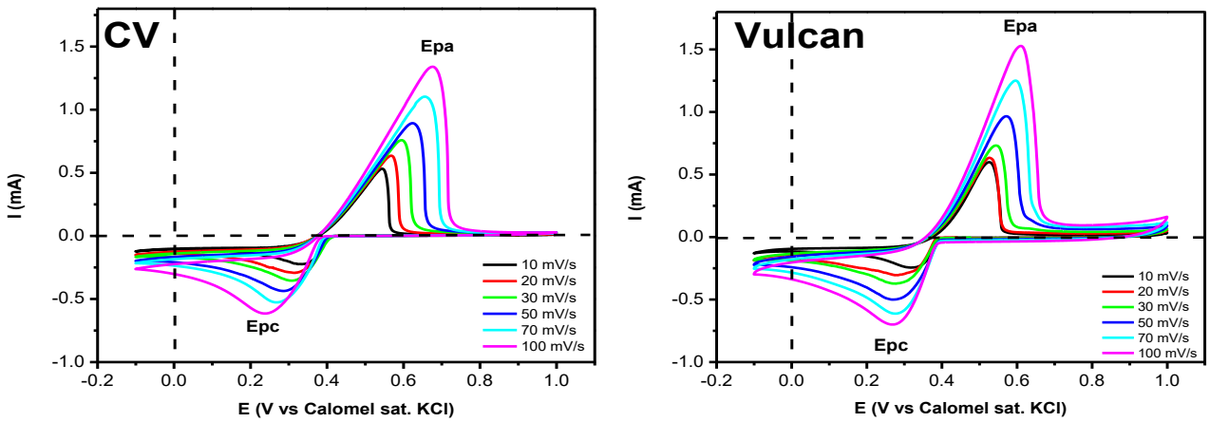


Figura 4

Respuestas voltamperométricas obtenidas sobre el carbón vítreo y la película vulcan en el sistema 0.01 M $AgNO_3$, 0.1 M KNO_3 a pH=7 a diferentes velocidades de barrido.

Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de conocer si el proceso está controlado por la difusión, se emplearon las corrientes de pico [catódica y anódica] y la ecuación de Randles-Servick:

$$I_p = [-2.69 \times 10^5] n^{3/2} A D^{1/2} C v^{1/2} \quad [3]$$

Donde: I_p = intensidad de corriente de pico [A], n = número de electrones intercambiados A = área superficial del electrodo [cm^2], D = coeficiente de difusión de la especie electroactiva [cm^2/s], C = concentración de la especie electroactiva [mol/cm^3] y v = velocidad de barrido [V/s]. El coeficiente de difusión de Ag^+ en 0.1 M KNO_3 es 1.55×10^{-5} cm^2/s. Graficando Ipc vs. □$^{1/2}$ e Ipa vs. □$^{1/2}$, se observa un comportamiento lineal; por lo tanto, obedece a la ecuación de Randles-Servick, esto indica que la reducción del ion Ag^+ está controlado por difusión. La difusión es independiente de la superficie del electrodo.

Box 6

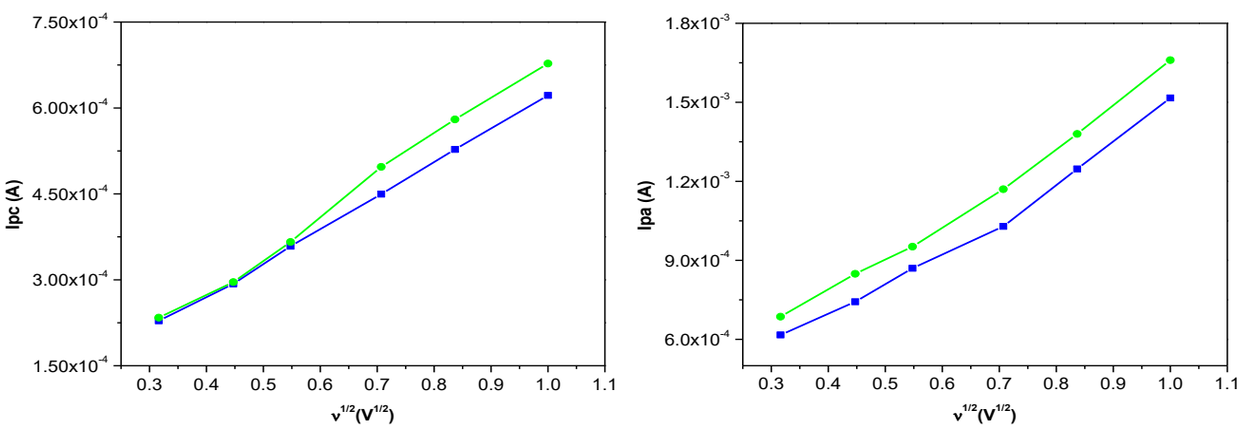


Figura 5

Relación del Ipc vs. □$^{1/2}$ e Ipa vs. □$^{1/2}$ obtenida de la figura 4 sobre el electrodo de carbón vítreo [línea azul] y la película de carbón [línea verde] en el sistema 0.01 M $AgNO_3$, 0.1 M KNO_3 a pH=7 a diferentes velocidades de barrido

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Con la caracterización de los dos diferentes tipos de carbón mediante SEM comprobamos la porosidad del carbón vulcan y la superficie plana del carbón vítreo. De acuerdo con las voltamperometrías cíclicas de potenciales de inmersión se observaron respuestas similares para la película vulcan y CV donde se describió un potencial de sobrecruce [*Ec*] asociado a un proceso de electrocristalización con valores de 0.3940 V y el 0.3849 V, respectivamente.

La voltamperometría cíclica permitió establecer el intervalo de potencial de 0.4 V a 0.2 V vs. Calomel sat. KCl, donde se lleva a cabo el electrodepósito de plata, dicho valor depende ligeramente del tipo de carbón. Observando que a mayor velocidad de barrido mayor será la corriente y los potenciales catódicos y anódicos se desplazan ligeramente hacía potenciales más negativos y positivos respectivamente.

Finalmente, la reducción del ion Ag[I] está controlado por difusión, la cual es independiente de la superficie del electrodo. Por lo tanto, las películas de carbón vulcan y carbón vítreo pueden aplicarse como soportes de partículas metálicas.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Garrido-González, Josseline: Contribuyó en el desarrollo experimental y la redacción del artículo.

Figueroa-Ramírez, Sandra Jazmín: Contribuyó al análisis de los resultados.

Sierra-Grajeda, Juan Manuel Tadeo: Contribuyó a la revisión de los resultados.

Mandujano-Ramírez, Humberto Julián: Contribuyó en la revisión de documento.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponibles previa solicitud al correo electrónico: sfigueroa@pampano.unacar.mx

Financiación

Este trabajo de investigación se realizó con recursos propios.

Agradecimientos

Josseline Garrido González agradece al SECIHTI la beca otorgada para sus estudios de maestría. Los autores desean agradecer al M.C. César Cima Mukul del Centro de Excelencia de Investigación en Servicios Petroleros y Protección Ambiental [CEISPPA]-Facultad de Ingeniería de la UNACAR por brindar los medios para realizar el electrodepósito de plata. Asimismo, al Ing. Rogelio Morán Elvira del Instituto de Energías Renovables [IER] de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM] por su apoyó en la obtención de las imágenes de SEM.

Abreviaturas

Ag	Plata
CV	Carbón vítreo
$RECO_2$	Reducción electroquímica del CO_2
SEM	Microscopio Electrónico de Barrido

Referencias

Antecedentes

Elattar, R. H., Magdy, G., Abdel Salam, R. A., Hadad, G. M., & El-Deen, A. K. [2024]. Cutting-edge progress in carbon nanomaterial-functionalized silver nanoparticles for enhanced optical and electrochemical sensing applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 181, 117995.

Li, G., Han, G., Wang, L., Cui, X., Moehring, N. K., Kidambi, P. R., … Sun, Y. [2023]. Dual hydrogen production from electrocatalytic water reduction coupled with formaldehyde oxidation via a copper-silver electrocatalyst. *Nature Communications*, 14[1], 525.

Linge, J. M., Erikson, H., Merisalu, M., Matisen, L., Käärik, M., Leis, J., … Tammeveski, K. [2018]. Oxygen Reduction on Silver Nanoparticles Supported on Carbide-Derived Carbons. *Journal of The Electrochemical Society*, 165[14], F1199-F1205.

Liu, Y., Wang, Q., Zhang, J., Ding, J., Cheng, Y., Wang, T., … Liu, B. [2022]. Recent Advances in Carbon-Supported Noble-Metal Electrocatalysts for Hydrogen Evolution Reaction: Syntheses, Structures, and Properties. *Advanced Energy Materials*, 12[28].

Básicos

Bouafia, A., Laouini, S. E., Ahmed, A. S. A., Soldatov, A. V., Algarni, H., Feng Chong, K., & Ali, G. A. M. [2021]. The Recent Progress on Silver Nanoparticles: Synthesis and Electronic Applications. *Nanomaterials,* 11[9], 2318.

Luo, H., Fu, H., Yin, H., & Lin, Q. [2022]. Carbon materials in persulfate-based advanced oxidation processes: The roles and construction of active sites. *Journal of Hazardous Materials*, 426, 128044.

Soporte

Beck, F., Loessl, M., & Baeumner, A. J. [2023]. Signaling strategies of silver nanoparticles in optical and electrochemical biosensors: considering their potential for the point-of-care. *Microchimica Acta,* 190[3], 91.

Guo, J., Hsu, A., Chu, D., & Chen, R. [2010]. Improving Oxygen Reduction Reaction Activities on Carbon-Supported Ag Nanoparticles in Alkaline Solutions. *The Journal of Physical Chemistry C,* 114[10], 4324-4330.

Truong, V. M., Yang, M.-K., & Yang, H. [2019]. Functionalized Carbon Black Supported Silver [Ag/C] Catalysts in Cathode Electrode for Alkaline Anion Exchange Membrane Fuel Cells. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6[4], 711-721.

Vega-Cartagena, M., Rojas-Pérez, A., Colón-Quintana, G. S., Blasini Pérez, D. A., Peña-Duarte, A., Larios-Rodríguez, E., … Cabrera, C. R. [2021]. Potential dependent Ag nanoparticle electrodeposition on Vulcan XC-72R carbon support for alkaline oxygen reduction reaction. *Journal of Electroanalytical Chemistry,* 891, 115242.

Zan, L., Amin, H. M. A., Mostafa, E., Abd-El-Latif, A. A., Iqbal, S., & Baltruschat, H. [2022]. Electrodeposited Cobalt Nanosheets on Smooth Silver as a Bifunctional Catalyst for OER and ORR: In Situ Structural and Catalytic Characterization. *ACS Applied Materials & Interfaces,* 14[50], 55458-55470.