

## ELECTROCATALIZADORES DE OG DOPADOS CON N Y FUNCIONALIZADOS CON FE PARA CONVERSIÓN DE OXÍGENO: EFECTO DEL MÉTODO DE SÍNTESIS

Kevin José Del Castillo Silva <sup>a,\*</sup>, Beatriz Ruiz Camacho <sup>a</sup>, Adriana Medina  
Ramírez <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad de Guanajuato, Laboratorio de Materiales, Dpto. de Ingeniería Química, Guanajuato,  
México 36050. [kj.delcastillosilva@ugto.mx](mailto:kj.delcastillosilva@ugto.mx)

### Resumen

El desarrollo de catalizadores bifuncionales rentables, estables y de alta eficiencia para la reacción de reducción de oxígeno (RRO) y la reacción de evolución de oxígeno (REO) constituye un desafío clave en tecnologías de conversión y almacenamiento de energía. Este proyecto busca evaluar de manera electroquímica un material bifuncional de óxido de grafeno (OG) dopado con nitrógeno y funcionalizados con hierro (Fe) sintetizado a partir de un método térmico (in-situ) e hidrotermal (post-síntesis). Se encontró que el material Fe-N-OG IS preparado de manera in situ mejoró la actividad electroquímica para la RRO, respecto al OG. En el caso de la REO, la mayor actividad electroquímica se obtuvo con el Fe-OG seguida del Fe-N-OG IS. Mediante difracción de rayos X (DRX) se encontraron los planos cristalográficos para el grafito y para especies de hierro metálico (Fe) y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. El análisis por espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) confirmó la coexistencia de especies Fe<sup>2+</sup> y Fe<sup>3+</sup>, destacando la importancia de esta última en la actividad electrocatalítica. Estos resultados revelan el potencial de los sistemas Fe-N-C derivados de óxido de grafeno como alternativas prometedoras a los catalizadores basados en metales nobles.

*Palabras clave:* RRO; REO; bifuncional; dopaje; electrocatalizadores.

## **N-DOPED, FE-FUNCTIONALIZED GO ELECTROCATALYSTS FOR OXYGEN CONVERSION: EFFECT OF THE SYNTHESIS METHOD**

### **Abstract**

The development of cost-effective, stable, and highly efficient bifunctional catalysts for the oxygen reduction reaction (ORR) and the oxygen evolution reaction (OER) remains a key challenge in energy conversion and storage technologies. This project aims to electrochemically evaluate a bifunctional nitrogen-doped graphene oxide (GO) material functionalized with iron (Fe), synthesized through both a thermal (in-situ) and a hydrothermal (post-synthesis) method. The Fe-N-GO IS material prepared in situ exhibited enhanced electrochemical activity toward ORR compared to pristine GO. In the case of OER, the highest electrochemical activity was observed for Fe-GO, followed by Fe-N-GO IS. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the crystallographic planes corresponding to graphite as well as the presence of metallic iron and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  species. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) analysis further revealed the coexistence of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  species, highlighting the crucial role of the latter in electrocatalytic activity. These findings demonstrate the potential of Fe-N-C systems derived from graphene oxide as promising alternatives to noble-metal-based catalysts.

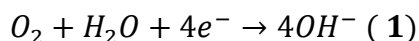
*Keywords:* RRO; REO; bifunctional; doping; electrocatalysts.

## 1. Introducción

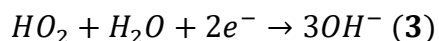
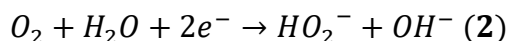
La urgencia por desarrollar tecnologías energéticas limpias, tales como celdas de combustible, electrolizadores de agua y baterías de metal-aire, se enfrenta al reto de mejorar la eficiencia de las reacciones de reducción de oxígeno (RRO) y evolución de oxígeno (REO). Estas reacciones presentan cinéticas intrínsecamente lentas, lo que demanda electrocatalizadores con alta actividad, estabilidad y bajo costo (Parvez y col., 2012).

La reacción de reducción de oxígeno (RRO) para producción de energía, que puede darse por ruta directa (transferencia de 4 electrones y por ruta indirecta (transferencia de 2 electrones) (Martínez-Huerta y col., 2017).

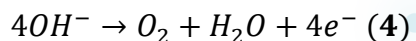
Ruta directa en medio básico:



Ruta indirecta en medio básico:



Y la reacción de evolución de oxígeno (REO) para su almacenamiento en medio básico (Fabbri y col., 2018).



El óxido de grafeno (OG) y sus derivados ofrecen una plataforma atractiva gracias a su alta área superficial, buena conductividad y abundancia de defectos, que permiten la incorporación de dopantes y especies metálicas activas. El dopaje con nitrógeno (N) modifica la densidad de estados electrónicos y crea sitios catalíticamente activos, como el N piridínico y el N grafitico, los cuales favorecen la adsorción y transformación de intermediarios de reacción. La funcionalización con hierro (Fe), ya sea en forma de nanopartículas, óxidos o especies coordinadas tipo Fe-N<sub>x</sub>, potencia la actividad catalítica y mejora la eficiencia de transferencia de electrones en la RRO (Ye y col., 2019; Lee y col., 2017).

El desempeño catalítico depende fuertemente del método de síntesis empleado. Estrategias como la pirolisis controlada de precursores que contienen Fe, N y C, el uso de precursores OG, la incorporación de estructuras derivadas de estructuras metal orgánicas (MOFs), por sus siglas en inglés, (p. ej., estructura zeolítica de imidazolato tipo 8 o ZIF-8, de igual manera, por sus siglas en inglés), o la funcionalización hidrotérmica/solvotérmica, modifican la distribución de dopantes, la coordinación Fe-N, el grado de reducción del OG y la porosidad del material, lo que

impacta directamente en la eficiencia electroquímica (Zhang y col., 2023; Zhang y col., 2025).

Estudios recientes muestran que materiales basados en carbono dopado con N y decorados con nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  alcanzan potenciales de inicio de  $\sim 0.93$  V y potenciales de media onda de  $\sim 0.83$  V vs Electrodo Reversible de Hidrogeno (ERH) con buena estabilidad (Ye y col., 2019). Otros trabajos destacan que estructuras de grafeno dopado con N que envuelven fragmentos de Fe metálico ( $\text{Fe@N-G}$ ) favorecen trayectorias de transferencia de cuatro electrones en ORR, con potenciales de media onda en torno a 0.82 V (Lee y col., 2017). De forma similar, materiales derivados de ZIF-8 sobre OG, que generan estructuras ricas en sitios  $\text{Fe-N}_x$  y nanopartículas de óxidos de Fe dispersas, muestran una notable mejora en densidad de corriente límite y durabilidad (Zhang y col., 2023).

Dado lo anterior, resulta de gran interés evaluar cómo diferentes métodos de síntesis influyen en la estructura fina de electrocatalizadores de OG dopados con N y funcionalizados con Fe, con el fin de establecer relaciones claras entre las condiciones de preparación, la generación de

sitios activos y el rendimiento en la conversión de oxígeno.

## 2. Objetivos

1. Realizar un dopaje en la matriz de OG mediante un método hidrotérmico.
2. Utilizar un método térmico para funcionalizar la estructura de OG y óxido de grafeno dopado con nitrógeno (N-OG) para adicionar hierro.
3. Evaluar electroquímicamente mediante voltametría cíclica (V.C.), voltametría lineal (V.L.) las reacciones de la RRO y REO.
4. Evaluar fisicoquímicamente mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS).

## 3. Experimental

### 3.1. Materiales y reactivos.

Los materiales y reactivos utilizados fueron óxido de grafeno (Sigma Aldrich), agua desionizada, hidróxido de potasio (KOH, 95%, Sigma Aldrich), cloruro férrico

hexahidratado ( $\text{FeCl}_3$ , 97%, Sigma Aldrich) y Urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ , 99%, Aldrich).

### 3.2. Síntesis de nanocompuestos Fe-N-OG

Para la síntesis de los compuestos nanoestructurados de **Fe-N-OG** se empleó la metodología reportada por Luque-Centeno y col., (2018) con algunas modificaciones. Inicialmente, se dispersó el **OG** de etanol mediante baño ultrasónico. Posteriormente, se añadió cloruro férrico hexahidratado y urea en una relación 1:20 p/p (metal:urea). La mezcla se agitó y se sometió a ultrasonido. La suspensión se dejó reposar a temperatura ambiente durante una noche para favorecer la formación de una pasta.

Dicha pasta se transfirió a un reactor tubular de cuarzo, calentándose hasta alcanzar  $800^\circ\text{C}$  bajo atmósfera de  $\text{N}_2$ , manteniéndose por 2 h. El producto resultante fue un polvo negro que se molió y recuperó, obteniéndose el material Fe-N-OG in situ (**Fe-N-OG IS**).

El material **Fe-OG-N** se realizó sintetizando primeramente óxido de grafeno dopado con nitrógeno (**N-OG**) mediante un proceso hidrotérmico. Para ello se dispersó **OG** y urea en agua desionizada por baño ultrasónico para posteriormente llevarlo a un tratamiento hidrotérmico en horno a  $180^\circ\text{C}$  durante 12

horas. Posteriormente se añadía el Fe utilizando el método termal a  $900^\circ\text{C}$  en atmósfera inerte.

Por último, el material **Fe-OG** siguió la misma metodología del material in situ con la diferencia de que, durante la síntesis, no se utilizó urea.

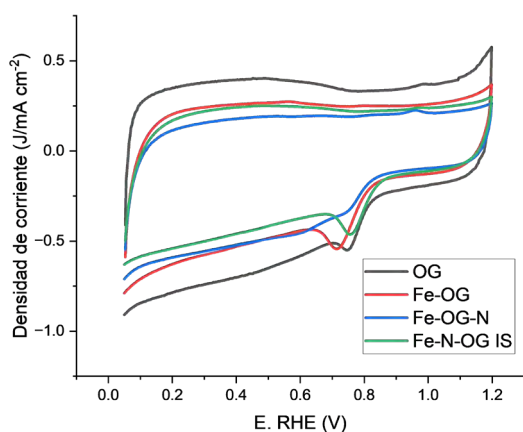
Los materiales sintetizados se caracterizaron fisicoquímicamente por DRX y XPS y se evaluaron en la RRO y REO como reacciones de media celda en 0.1 M KOH y 1 M KOH a temperatura ambiente, utilizando un potenciostato-galvanostato marca Gamry 1000T.

## 4. Resultados

### 4.1. Evaluación para la RRO

La Figura 1 se muestran los gráficos de VC de los materiales OG, Fe-OG, Fe-OG-N y Fe-N-OG IS, para analizar el efecto de la metodología de síntesis y la influencia del N. En los voltamogramas cíclicos de la Figura 1, se identifica un pico relacionado con la actividad redox del material en la zona catódica alrededor de 0.7 V, su formación se debe a la reducción de moléculas de  $\text{O}_2$ . El pico es más evidente y presenta un potencial

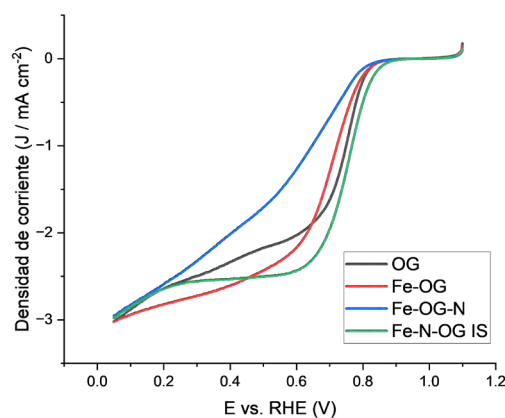
positivo mayor en Fe-N-OG IS que indica mayor actividad para catalizar la RRO respecto a los demás compuestos. Se observa una caída en la respuesta del voltaje por parte de los restantes materiales adicionados con hierro que se le atribuye a una mayor sinergia de las especies reactivas en la metodología térmica del Fe-N-OG IS comparado con los otros materiales.



**Figura 1.** Voltamperograma en atmosfera de O<sub>2</sub> de comparación de OG y materiales con hierro.

En la voltametría lineal de la Figura 2 se compara la actividad catalítica del material en la RRO con la curva de polarización de 1600 rpm en atmosfera de oxígeno. De aquí se destaca que el material Fe-N-OG IS que presenta potencial de inicio ( $E_{onset}=0.852$ ) con un valor más cercano a potencial estándar de la RRO ( $E=1.23$  V), por lo que presentara una alta cinética, así mismo se observa una mejoría en la respuesta electrocatalítica

respecto al material de partida (OG), esto se le atribuye a la presencia de nitrógeno dentro del material que funciona como sitio activo para la adsorción y desorción de oxígeno en estas reacciones además de evidenciar que esta metodología fomenta especies que funcionen como sitios activos.



**Figura 2.** Barrido de voltametría lineal a 1600 rpm para evaluar RRO en OG y materiales con hierro.

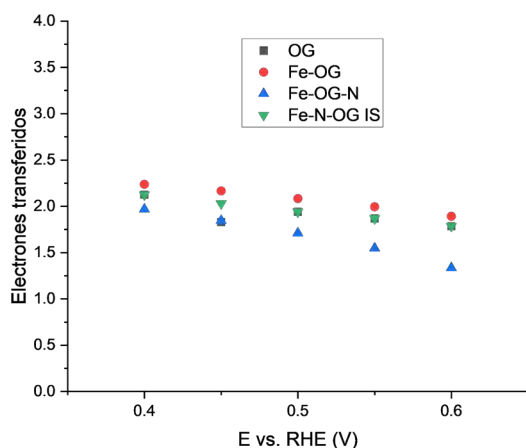
**Tabla 1.** Parámetros electroquímicos para evaluar RRO.

Material	$E_{onset}$ a 0.1 $mA\ cm^{-2}$ (V)	Potencial de media onda (V)
OG	0.824	0.775
Fe-OG	0.822	0.743
Fe-OG-N	0.804	0.561
Fe-N-OG IS	0.852	7.88



El  $E_{onset}$  se obtiene a una densidad de corriente de  $0.1 \text{ mA cm}^{-2}$ , así como los potenciales de media onda ( $E_{1/2}$ ) que se presentan en la Tabla 1. El número de electrones y los gráficos Koutecký-Levich se obtuvieron siguiendo la Ec. 5 con los siguientes valores:  $F= (96485 \text{ C/mol})$ ,  $A= 0.1963 \text{ cm}^2$ ,  $D=1.9 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $v=1.1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  y  $C=1.2 \cdot 10^6 \text{ mol cm}^3$  (Centeno y col., 2018) a 0.4V, 0.45 V, 0.5 V, 0.55 V y 0.6 V, obteniendo los resultados en la Figura 3 y Tabla 2.

$$i_{lim} = 0.62nFCAD_{O_2}^{2/3}v^{-1/6}\omega^{1/2} \quad (5)$$



**Figura 3.** Número de electrones transferidos calculados con Koutecký-Levich en OG y materiales con hierro.

La ruta que sigue el mejor material es de 2 electrones (Luque-Centeno y col., 2018)

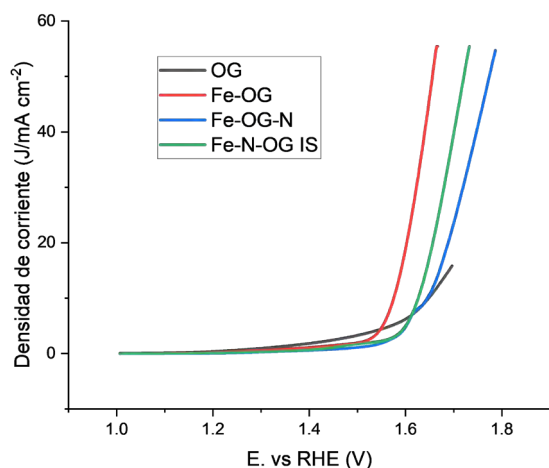
favoreciendo la cinética de esta reacción y generando resultados prometedores para su aplicación en sistemas de producción de energía.

**Tabla 2.** Número promedio de electrones transferidos para OG y materiales con hierro.

Material	Número de electrones transferidos
OG	1.94
Fe-OG	2.07
Fe-OG-N	1.68
Fe-N-OG IS	2.07

#### 4.2. Evaluación para la Reacción de Evolución de Oxígeno (REO)

La Figura 4 muestra la actividad catalítica para REO del material donde la pronunciación de la pendiente indica dicha respuesta. Se observan cambios significativos de la respuesta para los materiales con hierro respecto al OG, en particular para el material Fe-OG, y Co-N-OG IS que presentan menor valor positivo en el potencial, es decir, estos materiales presentan mayor actividad para esta REO.



**Figura 4.** Barrido de voltametría lineal a 1600 rpm para evaluar REO en OG y materiales con hierro.

Para evaluar la eficiencia de material para esta reacción se tomó una densidad de corriente de referencia de  $10 \text{ mA cm}^{-2}$ , al medir el potencial en este punto se presentan los resultados de la Tabla 3 donde destaca el Fe-OG con menor potencial, el cual es 70 mV más activo que el OG

**Tabla 3.** Parámetros electroquímicos para evaluar REO.

Material	Potencial a $10 \text{ mA cm}^{-2}$ (V)
OG	1.65
Fe-OG	1.58
Fe-OG-N	1.65
Fe-N-OG IS	1.63

#### 4.3. Caracterización fisicoquímica

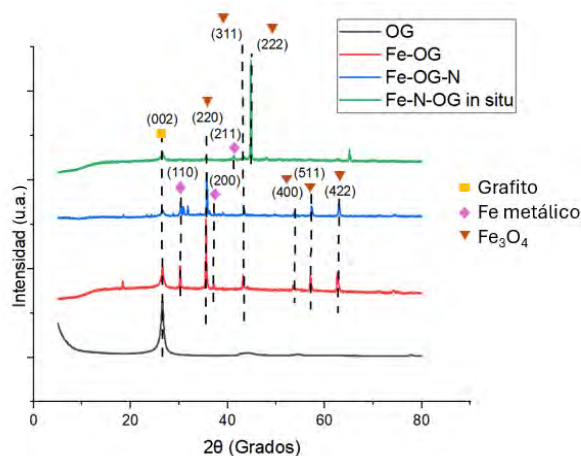
Las pruebas de DRX se desarrollaron utilizando un difractómetro PANalytical Modelo Empyrean utilizando una radiación  $\text{CuK}\alpha$  con una longitud de onda de  $1.5418 \text{ \AA}$  para el estudio de las fases y cristalinidad de los materiales.

La Figura 5 muestra los resultados de DRX donde se observa el pico característico para grafito a ángulo de  $2\theta \approx 26.5^\circ$  correspondiente al plano (002) (Luque-Centeno y col., 2018). La intensidad del pico para estos materiales es alta y suele ser angosto, en especial para el OG, debido al alto de grafitización del material. Se observa caras características de la estructura de Fe metálico en  $\sim 32^\circ$ ,  $\sim 37^\circ$  y  $\sim 43^\circ$  correspondiente al plano (110), (200) y (211) respectivamente en JCPDS 87-0722 (Fan y col., 2023), además, se observa señales características para el  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en  $\sim 30.1^\circ$ ,  $\sim 35.7^\circ$ ,  $\sim 37.3^\circ$ ,  $\sim 53.4^\circ$ ,  $\sim 57.8^\circ$  y  $\sim 62.8^\circ$  correspondientes a las caras (220), (311), (222), (422), (511) y (400) en base a la carta cristalográfica JCPDS 96-900-5843 (Kakaei y col., 2025).

Las señales en el difractograma sugieren el dopaje con nitrógeno en la estructura de óxido de grafeno y la adición de hierro en una estructura  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , en especial para el plano



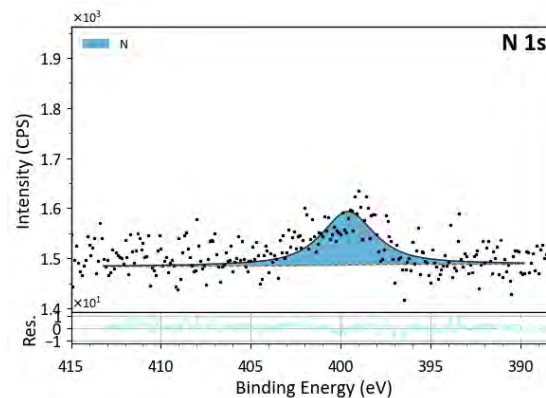
(222) para Fe-N-OG IS, la configuración de la estructura cristalográfica encontrada contribuye a la explicación de la alta eficiencia de estos materiales a la respuesta en la RRO y REO.



**Figura 5.** Espectro de difracción de rayos X para evaluar la composición fisicoquímica de OG y materiales con hierro.

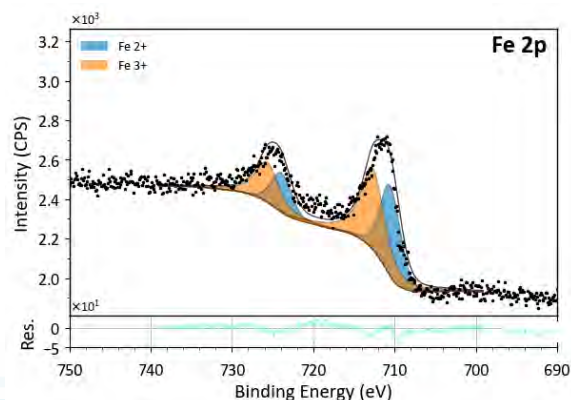
Las pruebas XPS se desarrollaron usando un sistema de XPS (SPECS Phoibos 150) para determinar la composición elemental. Se realizó el análisis de XPS para la muestra Fe-N-OG IS y Fe-OG, siendo las más activas para RRO y REO, para evaluar las especies que influyen en la respuesta catalítica de los materiales (Fan y col., 2023; Kakaei y col., 2025). El material Fe-N-OG IS presenta una mayor respuesta debido a la incorporación de nitrógeno en la muestra, que, además de funcionar como sitio activo, permite un mejor

anclaje de las especies de hierro en la estructura del material.



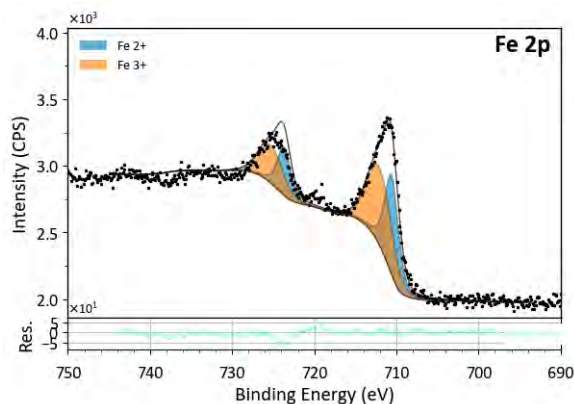
**Figura 6.** Espectro XPS N1s de Fe-N-OG IS.

Así mismo, la metodología de síntesis usada favoreció la sinergia de las especies que se forman en el material, generando una mayor proporción de  $\text{Fe}^{3+}$ , como se presentan en la Figura 7, que corresponde a compuestos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , siendo este último altamente activo para la RRO y REO (Zhang y col., 2025) y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que tiende a ser más selectivo para la REO (Schöttner y col., 2019).



**Figura 7.** Espectro XPS Fe2p de Fe-N-OG IS.

Por su parte, el espectro Fe2p para Fe-OG en la Figura 8 presenta una proporción mayor de  $\text{Fe}^{2+}$  que corresponde a especies FeO, siendo este menos eficiente para las reacciones de interés (Humayun y col., 2024).



**Figura 8.** Espectro XPS Fe2p de Fe-OG.

Los resultados de porcentaje atómico obtenido con XPS se presentan la Tabla 4 donde se corrobora la importancia que la presencia de nitrógeno y de especie de hierro  $\text{Fe}^{3+}$  favorece la actividad catalítica de los materiales. Se confirma lo anterior al observar mayor proporción de  $\text{Fe}^{3+}$  en el material Fe-N-OG IS que obtuvo un mayor rendimiento electrocatalítico.

**Tabla 4.** Datos de composición obtenidos con XPS.

Material	Especie	Porcentaje atómico (%)
Fe-OG	C1s	88.45
	O1s	7.75
	Fe 2p $\text{Fe}^{3+}$	2.08
	Fe 2p $\text{Fe}^{2+}$	1.71
Fe-N-OG IS	C1s	89.68
	N1s	1.13
	O1s	5.71
	Fe 2p $\text{Fe}^{3+}$	2.04
	Fe 2p $\text{Fe}^{2+}$	1.45

## 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten confirmar el carácter altamente electroactivo del material Fe-N-OG IS en la reacción de reducción de oxígeno (RRO) y los materiales de hierro en la reacción de evolución de oxígeno (REO), en especial el Fe-OG. Este comportamiento se atribuye a la sinergia generada entre los elementos constituyentes durante la metodología de síntesis, lo cual resalta la importancia del control de las condiciones experimentales en el desempeño electrocatalítico final. Los análisis de DRX evidenciaron la reducción efectiva del óxido

de grafeno a lo largo de los procesos térmico e hidrotérmico, además de corroborar la formación de especies metálicas distribuidas en la matriz carbonosa, que resultan determinantes en la mejora de la actividad catalítica.

De manera complementaria, los estudios de XPS revelaron que la elevada respuesta electroactiva está asociada con la formación de estructuras de las especies de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y la presencia de nitrógeno. Estos sitios activos no solo favorecen el transporte eficiente de carga, sino que también optimizan la transferencia de masa, aspectos críticos para el desempeño en procesos de conversión electroquímica de oxígeno. Asimismo, se corroboró la relevancia de la incorporación de nitrógeno en la matriz de óxido de grafeno, ya que este elemento contribuye a la modulación electrónica del material y potencia la interacción entre los centros metálicos y la fase carbonosa.

En conjunto, los hallazgos obtenidos consolidan a los materiales nanoestructurados de Fe-N-OG IS con gran potencial para aplicaciones en producción de energía y al Fe-OG con gran potencial en el almacenamiento de energía, abriendo la posibilidad de su implementación en

tecnologías sostenibles como celdas de combustible y dispositivos de electrólisis.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la DAIP por el proyecto 339/2025 y al CECIHTI por la beca de maestría de KJCS.

### Referencias bibliográficas

Gecarbon (2020). *Electrocatalisis para las reacciones de reducción y evolución de oxígeno y su implicación en el almacenamiento de energía renovable*. [https://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC\\_055-art05.pdf](https://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_055-art05.pdf)

Fabbri, E., y Schmidt, T.J. (2018). Oxygen Evolution Reaction—The Enigma in Water Electrolysis. *ACS Catalysis*, 8(10), 9765-9774. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b02712>

Fan, X., Xu, Z., Wang, J., Wang, H., Wei, H., Wang, Q., Wang, C., y Shen, Q. (2023). Constructing magnetic iron-based core-shell structure and dielectric nitrogen-doped reduced graphene oxide nanocomposite for enhanced microwave absorption

performance. *Applied Surface Science*, 608, 155013.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155013>

Humayun, A., Manivelan N., Y., y Peabakar, K. (2024). Charge transfer in n-FeO and p- $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles for Efficient Hydrogen and Oxygen Evolution Reaction. *Nanomaterials*, 14(18), 15150.

<https://doi.org/10.3390/nano14181515>

Jiao, X., Qiu, Y., Zhang, L., y Zhang, X. (2017). Comparison of the characteristic properties of reduced graphene oxides synthesized from natural graphite with different graphitization degrees. *RSC Advances*, 7(82), 52337–52344.

<https://doi.org/10.1039/C7RA10809E>

Kakaei, K., Aykut, Y., y Bayrakceken, A. (2025). Facile synthesis multifaceted Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> based on N-doped porous carbon frameworks for ORR/OER and study of an external magnetic field. *Electrochimica Acta*, 541, 147319.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.147319>

Lee, J.Y., Shin, D.Y., Park, H-Y., Lee, S-S., Kwon, S.J, Lim, D-H., Bong, K.W., Son, J.G., y Kim, J.Y. (2017). Nitrogen-doped

graphene-wrapped iron nanofragments for high-performance oxygen reduction electrocatalysts. *Journal of Nanoparticle Research*, 19, 98.

<https://doi.org/10.1007/s11051-017-3793-y>

Luque-Centeno, J. M., Martínez-Huerta, M. V., Sebastián, D., Lemes, G., Pastor, E., y Lázaro, M. J. (2018). Bifunctional N-doped graphene Ti and Co nanocomposites for oxygen reduction and evolution reactions. *Renewable Energy*, 125, 182–192.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.073>

Martínez-Huerta, M.V., y Lázaro M.J. (2017). Electrocatalysts for low temperature fuel cells. *Catalysis Today*, 285(1), 3-12.

<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.02.015>

Parvez, K., Yang, S., Hernandez, Y., Winter, A., Turchanin, A., Feng, X. y Müllen, K. (2012). Nitrogen-doped graphene and its iron-based composite as efficient electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *ACS Nano*, 6(11), 9541-9550.

<https://doi.org/10.1021/nn302674k>

Schöttner, L., Nefedov, A., Yang, C., Heissler, S., Wang, Y., y Wöll, C. (2019). Structural evolution of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) surfaces under reduction conditions monitored by infrared spectroscopy.

*Frontiers in Chemistry*, 7, 451.

<https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00451>

Wang, Y., Liu, W., Wang, R., Wang, Q., Luo, S., Hou, P., Zhang, Y., Yan, S., Liu, X., y Guo, J. (2024). Preparation of High-Efficiency Fe/N-Doped Carbon Catalysts Derived from Graphite Phase Carbon Nitride for Reduction of Oxygen. *Catalysts*, 14(4), 279. <https://doi.org/10.3390/catal14040279>

Ye, Y., Wang, B., Liu, G., Xu, L., Xia, J., y Li, H. (2019). Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles modified 2D N-doped porous graphene-like carbon as an efficient and robust electrocatalyst for oxygen reduction reaction. *ChemistrySelect*, 4(14), 4131–4139. <https://doi.org/10.1002/slct.201900533>

Zhang, J., Wang, J., Fu, Y., Peng, X., Xia, M., Peng, W., Liang, Y., y Wei, W. (2025). Nanoscale Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction. *Molecules*, 30(8), 1753. <https://doi.org/10.3390/molecules30081753>

Zhang, Y., He, P., y Zhuo, D. (2023). Fe/N-Doped Carbon Framework Derived from ZIF-8 on Graphene Oxide for Efficient Oxygen Reduction Reaction. *Electron. Mater. Lett.*, 20, 95–101. <https://doi.org/10.1007/s13391-023-00441-4>