

MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DEL ÓXIDO DE GRAFENO MEDIANTE TRATAMIENTO CON PLASMA: UNA REVISIÓN

SURFACE MODIFICATION OF GRAPHENE OXIDE VIA PLASMA TREATMENT: A REVIEW

MORONES SILLAS, Jacqueline ¹

FLORES VILLASEÑOR, Sergio
Enrique ¹

SORIA ARGÜELLO, Gustavo ²

NEIRA VELÁZQUEZ, María
Guadalupe ²

RESUMEN

El óxido de grafeno (OG) es un material bidimensional con propiedades fisicoquímicas altamente ajustables, cuya modificación superficial resulta clave para aplicaciones avanzadas. En este contexto, los tratamientos por plasma representan una estrategia eficiente, limpia y controlable para inducir reducción, dopaje y funcionalización selectiva. Esta revisión analiza de manera comparativa el efecto de distintos tipos de plasma (H_2 , O_2 , N_2/NH_3 , Ar, CH_4 y plasmas atmosféricos) sobre la química superficial del OG, estableciendo correlaciones entre los parámetros de proceso, los grupos funcionales introducidos o eliminados y las propiedades finales del material. Se observa que los plasmas reductores (H_2 y Ar) disminuyen el contenido de grupos oxigenados y aumentan la conductividad eléctrica, mientras que los plasmas reactivos (N_2/NH_3) inducen dopaje con nitrógeno y modifican la estructura electrónica. Por su parte, el plasma de O_2 permite controlar la densidad de grupos funcionales, y los plasmas carbonados (CH_4) contribuyen a la reparación de defectos estructurales. Finalmente, se discuten aplicaciones en sensores, membranas, electrónica flexible y biomedicina, destacando los compromisos entre la reducción, los defectos y la funcionalización. Asimismo, se analizan las limitaciones actuales en la reproducibilidad, la escalabilidad y el control fino del dopaje, así como las tendencias emergentes en el plasma atmosférico, los procesos roll-to-roll y el plasma asistido por inteligencia artificial.

Palabras clave: óxido de grafeno, plasma, modificación superficial, ingeniería de superficies, materiales bidimensionales.

1. Facultad de Metalurgia,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Monclova, Coahuila,
México.

2. Centro de Investigación en
Química Aplicada. Saltillo,
Coahuila, México.

Correspondencia
sergio.villasenor@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0002-5465-8476>

Fecha de recepción
1 de diciembre de 2025.

Fecha de aceptación
5 de mayo de 2026.

ABSTRACT

Graphene oxide (OG) is a two-dimensional material with highly tunable physicochemical properties, whose surface modification is essential for advanced applications. Plasma treatments have emerged as an efficient, clean, and controllable strategy to induce reduction, heteroatom doping, and selective functionalization.

This review provides a comparative analysis of different plasma types (H_2 , O_2 , N_2/NH_3 , Ar, CH_4 , and atmospheric plasmas), establishing correlations between processing parameters, induced functional groups, and resulting material properties. Reducing plasmas reduce oxygen-containing groups and enhance electrical conductivity, while reactive plasmas enable nitrogen doping and electronic-structure modulation. Oxygen plasma enables controlled functionalization, whereas carbon-based plasmas promote defect healing and structural restoration. Applications in sensing, separation membranes, flexible electronics, energy systems, and biomedicine are discussed, highlighting trade-offs between reduction, defect generation, and functionalization. Current limitations in scalability and reproducibility are also addressed, along with future trends in atmospheric plasma, roll-to-roll processes, hybrid plasma systems, and AI-assisted optimization.

Keywords: graphene oxide, plasma treatment, surface modification, surface engineering, two-dimensional materials.

INTRODUCCIÓN

La modificación superficial de materiales bidimensionales mediante tratamientos por plasma se ha consolidado como una estrategia clave para ajustar de manera controlada sus propiedades electrónicas, químicas y mecánicas, con aplicaciones crecientes en sensores, electrónica flexible y biomedicina (Boulos et al., 2023; Johnson et al., 2023).

En este contexto, el óxido de grafeno (OG) ha emergido como un material de gran interés en la ingeniería de superficies debido a su elevada densidad de grupos funcionales, su facilidad de procesamiento y su compatibilidad con métodos de producción a gran escala (Mancera Zapata & Morales Narváez,

2023; Pei & Cheng, 2012). Su estructura heterogénea, compuesta por dominios sp^2 interrumpidos por grupos oxigenados, le confiere alta reactividad química y buena dispersabilidad en medios acuosos; sin embargo, esta misma oxidación reduce considerablemente su conductividad eléctrica y altera sus propiedades electrónicas (Jaramillo-Fierro & Cuenca, 2024; Xiang et al., 2022).

Se han empleado diversos métodos para modificar el OG, entre ellos la reducción química, la térmica y la electroquímica. No obstante, dichos enfoques presentan limitaciones importantes, como el uso de reactivos tóxicos, altos requerimientos energéticos, tiempos de procesamiento prolongados y escaso control de la funcionalización superficial (Politano & Versace, 2022).

En contraste, los tratamientos por plasma permiten modificar selectivamente la superficie mediante procesos secos, rápidos y altamente controlables. Dependiendo del gas empleado y las condiciones de operación, es posible inducir reducción, dopaje o funcionalización superficial, ajustando propiedades clave como conductividad eléctrica, densidad de defectos, energía superficial y biocompatibilidad (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016).

A pesar del creciente número de estudios sobre plasma y materiales basados en grafeno, la comprensión específica de cómo cada tipo de plasma modifica la química superficial del OG sigue fragmentada. Esto dificulta el establecimiento de criterios claros para el diseño racional y la optimización de tratamientos orientados a aplicaciones específicas. Por ello, el objetivo de esta revisión es analizar de manera sistemática el efecto de diferentes tratamientos por plasma sobre el óxido de grafeno, estableciendo relaciones entre parámetros de proceso, modificaciones estructurales inducidas y propiedades resultantes del material.

2.- FUNDAMENTOS DEL ÓXIDO DE GRAFENO

2.1 ESTRUCTURA QUÍMICA Y ELECTRÓNICA DEL OG

El óxido de grafeno es un derivado oxidado del grafeno que contiene una estructura híbrida compuesta por regiones de carbono sp^2 y sp^3 (Pei & Cheng, 2012; Xiang et al., 2022). Durante el proceso de oxidación se introducen grupos funcionales oxigenados, tales como hidroxilos, epóxidos, carbonilos y carboxilos, los cuales alteran la continuidad electrónica de la red grafitica.

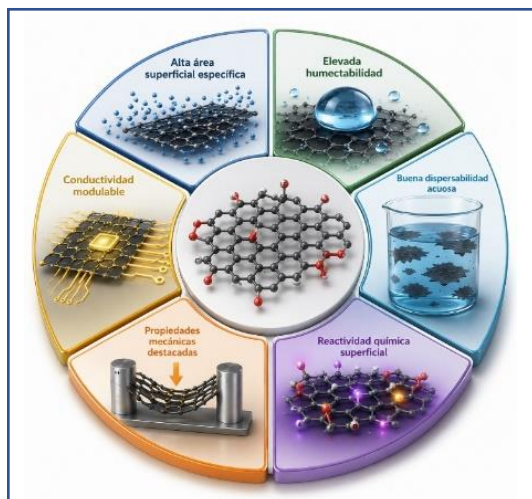
La presencia de estos grupos funcionales genera defectos estructurales y reduce la movilidad electrónica del material (Jaramillo-Fierro & Cuenca, 2024). No obstante, también incrementa su reactividad química, lo que favorece procesos de funcionalización y dispersión en solventes polares.

Desde el punto de vista electrónico, la interrupción de la conjugación π modifica la densidad electrónica y abre una banda prohibida parcial, transformando al grafeno conductor en un material semiconductor o aislante dependiendo del grado de oxidación (Politano & Versace, 2022; Xiang et al., 2022).

2.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL OG

El OG posee propiedades altamente ajustables mediante modificación superficial. En la figura 1 se presentan las más relevantes.

Figura 1. Propiedades del óxido de grafeno mediante modificación superficial.



3. FUNDAMENTOS DEL PLASMA APLICADOS A MATERIALES

3.1 DEFINICIÓN Y TIPOS DE PLASMA

El plasma es considerado el cuarto estado de la materia y consiste en un gas parcialmente ionizado compuesto por electrones, iones, radicales libres, especies metaestables y fotones UV (Boulos et al., 2023). Dependiendo de la temperatura y de la presión de operación, los plasmas pueden clasificarse como térmicos o no térmicos.

En aplicaciones de modificación superficial de materiales predominan los plasmas fríos o no térmicos, debido a que permiten inducir cambios químicos superficiales sin generar daño térmico significativo en el material (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016). Entre los sistemas más utilizados destacan el plasma de radiofrecuencia (RF), el plasma de corriente continua (DC, por sus siglas en inglés), el plasma de microondas, el plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD, por sus siglas en inglés) y el plasma atmosférico.

3.2 INTERACCIÓN PLASMA-SUPERFICIE

Cuando el plasma interactúa con la superficie del OG, ocurren diversos fenómenos físicos y químicos, como se presenta en la figura 2.

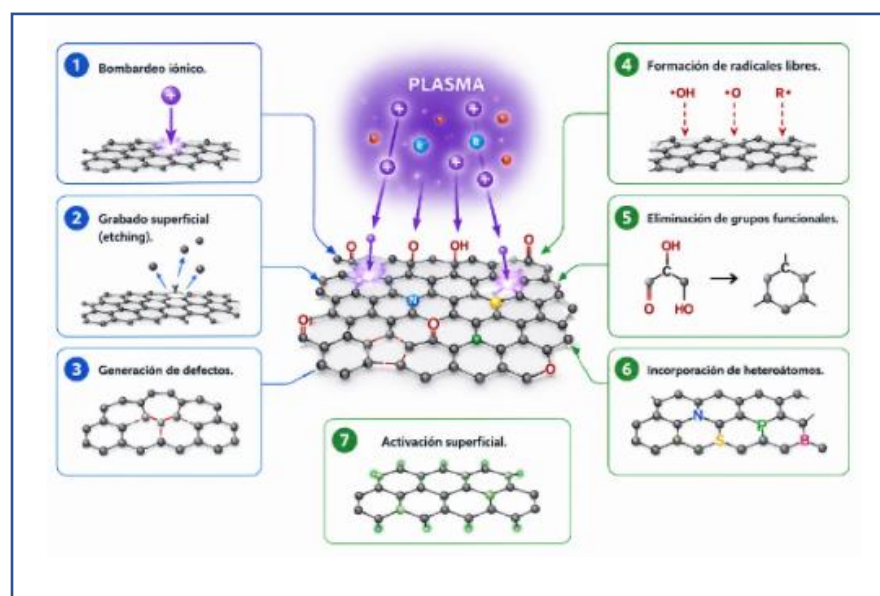


Figura 2. Propiedades del óxido de grafeno mediante modificación superficial.

Las especies activas del plasma rompen enlaces químicos superficiales y favorecen procesos de reducción, funcionalización o dopaje dependiendo de la naturaleza del gas empleado (Raza et al., 2021; Jafari et al., 2022).

3.3 PARÁMETROS CRÍTICOS DEL PROCESO

Los tratamientos con plasma dependen en gran medida de las condiciones experimentales empleadas. En la tabla 1 se muestran los parámetros más importantes.

Tabla 1. Parámetros críticos en los tratamientos por plasma y su influencia principal sobre las características fisicoquímicas y la modificación superficial de materiales.

Parámetro	Influencia principal
Potencia	Controla la energía de las especies activas
Presión	Determina densidad electrónica y colisiones
Tiempo de exposición	Regula grado de modificación superficial
Tipo de gas	Define mecanismos químicos inducidos
Temperatura	Influye en estabilidad estructural
Frecuencia	Modifica estabilidad de la descarga
Flujo de gas	Controla concentración de especies activas
Distancia electrodo-muestra	Afecta uniformidad del tratamiento

Potencias elevadas y tiempos prolongados pueden favorecer la reducción del OG; sin embargo, también incrementan la probabilidad de generar defectos estructurales excesivos (Kondratowicz et al., 2018; El-Hossary et al., 2021).

4. MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DEL OG VÍA PLASMA

Los tratamientos con plasma constituyen una de las estrategias más versátiles y eficientes para modificar superficialmente materiales basados en carbono, en particular el óxido de grafeno (OG). La interacción entre las especies activas presentes en el plasma, como electrones, radicales libres, iones y fotones UV, y la superficie del OG permite inducir transformaciones químicas y estructurales



controladas sin afectar significativamente el volumen del material (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016).

Dependiendo del tipo de gas utilizado, el plasma puede promover procesos de reducción, funcionalización, dopaje, activación superficial o reparación estructural, como se observa en la figura 3. Asimismo, parámetros como potencia, presión, tiempo de exposición, flujo de gas y temperatura influyen directamente sobre el grado de modificación inducido y sobre las propiedades finales del material (Raza et al., 2021; El-Hossary et al., 2021).

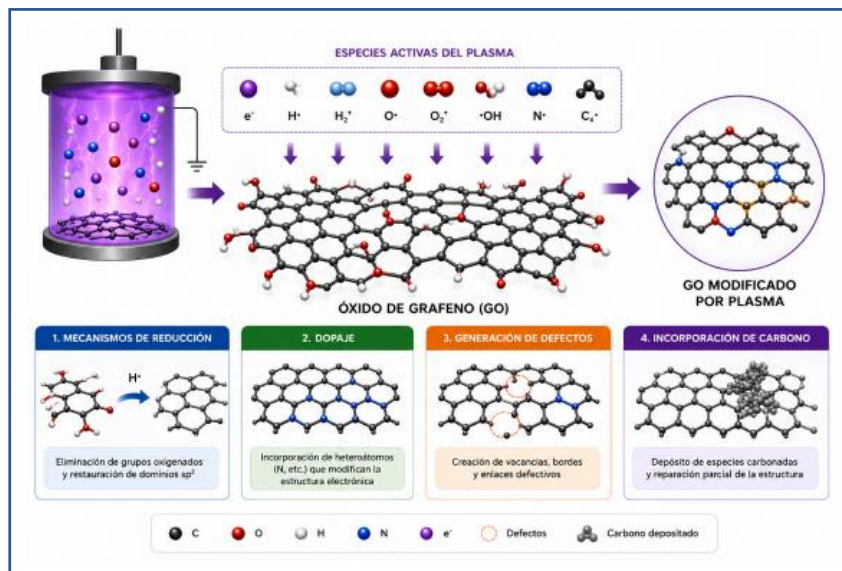


Figura 3. Interacción plasma – óxido de grafeno (OG)

En general, los mecanismos de interacción plasma–OG incluyen: eliminación de grupos funcionales oxigenados, restauración parcial de dominios sp^2 , generación controlada de defectos, incorporación de heteroátomos, activación superficial, grabado superficial (etching) y reconstrucción parcial de la red gráfica.

Estas modificaciones afectan propiedades como la conductividad eléctrica, la energía superficial, la humectabilidad, la actividad catalítica y la biocompatibilidad.

4.1 PLASMA DE HIDRÓGENO (H_2)

El plasma de hidrógeno es ampliamente utilizado como agente reductor debido a la elevada reactividad de los radicales $H^\bullet$ generados durante la

descarga. Estas especies activas reaccionan con grupos funcionales oxigenados presentes en el OG, tales como epóxidos, hidroxilos, carbonilos y carboxilos, promoviendo su eliminación en forma de H_2O y otros subproductos volátiles (Pei & Cheng, 2012; Raza et al., 2021).

Como consecuencia de esta reducción, ocurre una restauración parcial de los dominios conjugados sp^2 , lo que favorece la recuperación de las propiedades electrónicas del material. Diversos estudios han reportado incrementos significativos en la conductividad eléctrica del OG después de tratamientos con plasma de H_2 , pasando de valores típicos del orden de 10^{-6} – 10^{-7} S/cm hasta aproximadamente 10^{-2} – 10^{-3} S/cm dependiendo de las condiciones experimentales (Fraih & Mutlaq, 2021; Kurtishaj Hamzaj et al., 2024).

Además de la reducción química, el plasma de hidrógeno puede inducir modificaciones morfológicas asociadas al grabado superficial y a la reorganización de los defectos. No obstante, exposiciones prolongadas o potencias elevadas pueden provocar un daño estructural excesivo y deteriorar parcialmente la red cristalina del material (Kondratowicz et al., 2018).

Entre los parámetros críticos reportados para el plasma de H_2 destacan presiones entre 10^{-1} y 10^{-3} Torr, potencias entre 20 y 200 W y tiempos de tratamiento inferiores a 30 minutos, condiciones que permiten obtener una reducción eficiente de los defectos estructurales (Raza et al., 2021).

La restauración parcial de la red sp^2 mediante plasma de H_2 ha resultado particularmente relevante en aplicaciones de sensores, electrónica flexible y dispositivos electroquímicos, donde se requieren alta conductividad eléctrica y rápida transferencia de electrones (Dey et al., 2020).

4.2 PLASMA DE ARGÓN (Ar)

El plasma de argón es una alternativa ampliamente utilizada para modificar físicamente la superficie del OG, ya que el argón es un gas químicamente inerte. En este caso, los principales mecanismos de modificación se producen mediante bombardeo iónico y pulverización superficial (*sputtering*), procesos que favorecen la remoción física de átomos y grupos funcionales superficiales (Kondratowicz et al., 2018).

El impacto de iones Ar^+ sobre la superficie del OG induce defectos estructurales, vacancias y desorden local en la red cristalina. Aunque estos defectos pueden disminuir parcialmente la movilidad electrónica, también



generan sitios activos favorables en aplicaciones catalíticas y de detección química (Raza et al., 2021).

Uno de los principales efectos del plasma de Ar es la activación superficial del material, lo que incrementa la energía superficial y favorece procesos posteriores de funcionalización química o de deposición de recubrimientos. Asimismo, el sputtering inducido puede contribuir a la eliminación parcial de grupos oxigenados y contaminantes superficiales.

Estudios recientes han demostrado que tratamientos con plasma de Ar atmosférico mejoran significativamente la humectabilidad y biocompatibilidad del OG, favoreciendo la adhesión celular y la interacción con biomoléculas (Alam et al., 2020).

Sin embargo, uno de los principales desafíos asociados con el plasma de argón es el control de la densidad de defectos generados. Potencias elevadas y tiempos excesivos pueden provocar degradación estructural severa y fragmentación de las láminas de OG (Johnson et al., 2023).

4.3 PLASMA DE OXÍGENO (O_2)

El plasma de oxígeno se emplea principalmente para inducir la oxidación controlada y la funcionalización superficial del OG. Durante la descarga se generan radicales $O\bullet$, iones O_2^+ y especies excitadas, capaces de reaccionar con la superficie del material, lo que promueve la incorporación o redistribución de grupos oxigenados (El-Hossary et al., 2021).

La funcionalización inducida por plasma O_2 incrementa significativamente la humectabilidad y la energía superficial del OG, favoreciendo aplicaciones en las que se requiere una elevada interacción con medios acuosos, biomoléculas o polímeros. En muchos casos, el ángulo de contacto disminuye considerablemente tras el tratamiento, lo que indica una mayor afinidad superficial por el agua (Alam et al., 2020).

Asimismo, el plasma de oxígeno puede emplearse para generar defectos controlados y modificar selectivamente la densidad de sitios activos en la superficie del OG. Dependiendo de las condiciones experimentales, el tratamiento puede favorecer tanto la oxidación adicional como la reducción parcial del material, debido a procesos de desorción de oxígeno superficial (Kondratowicz et al., 2018).



Los sistemas RF (radiofrecuencia) de baja potencia se utilizan con especial frecuencia para evitar daños estructurales excesivos y mantener la integridad de las láminas de OG. En este contexto, El-Hossary et al. (2021) reportaron transformaciones significativas en la química superficial del OG mediante plasma frío de oxígeno de radiofrecuencia (RF).

La modificación superficial inducida por plasma de O_2 resulta especialmente relevante en aplicaciones biomédicas, membranas de separación, sensores y recubrimientos funcionales, donde la energía superficial y la interacción interfacial desempeñan un papel fundamental.

4.4 PLASMA DE NITRÓGENO Y AMONÍACO (N_2/NH_3)

Los plasmas de nitrógeno y de amoníaco se utilizan ampliamente para inducir dopaje heteroatómico en materiales basados en grafeno. Durante el tratamiento, especies activas nitrogenadas interactúan con defectos y vacancias presentes en el OG, promoviendo la incorporación de nitrógeno en configuraciones piridínicas, pirrónicas y grafíticas (Jafari et al., 2022).

El dopaje con nitrógeno modifica significativamente la estructura electrónica del material, alterando la distribución de carga y favoreciendo la transferencia de electrones. Como resultado, el OG dopado con nitrógeno presenta mejoras en la conductividad eléctrica, la actividad electrocatalítica y la estabilidad química.

La incorporación de nitrógeno también incrementa la densidad de sitios catalíticos activos para reacciones electroquímicas como reacción de reducción de oxígeno (ORR, por sus siglas en inglés) y reacción de evolución de hidrógeno (HER, por sus siglas en inglés), aplicaciones particularmente relevantes en celdas de combustible, supercapacitores y producción de hidrógeno (Jafari et al., 2022; Wang et al., 2016).

Diversos estudios han demostrado que el tipo de configuración nitrogenada depende en gran medida de parámetros como la temperatura, la potencia y la composición gaseosa. Por ejemplo, temperaturas moderadas favorecen configuraciones pirrónicas, mientras que tratamientos más energéticos promueven nitrógeno grafítico, asociado con una mayor conductividad eléctrica.



El uso de NH_3 (amoníaco) como precursor permite alcanzar niveles más altos de dopaje debido a la elevada concentración de especies reactivas nitrogenadas presentes en el plasma. Sin embargo, exposiciones prolongadas pueden inducir defectos excesivos y degradación estructural.

4.5 PLASMA CARBONADO (CH_4 Y OTROS)

Los plasmas carbonados, particularmente aquellos basados en CH_4 (metano), representan una estrategia interesante para inducir la reparación estructural y la reconstrucción parcial de la red grafitica del OG. Durante la descarga, el metano se fragmenta generando radicales y especies carbonadas reactivas que pueden incorporarse sobre defectos y vacancias presentes en el material (Baraket et al., 2016).

A diferencia de otros plasmas enfocados principalmente en reducción o funcionalización, los plasmas carbonados permiten procesos simultáneos de eliminación de oxígeno e incorporación de carbono, favoreciendo la recuperación parcial de dominios conjugados sp^2 .

Baraket et al. (2016) demostraron que la presencia de un ambiente rico en carbono durante los tratamientos de plasma favorece la reconstrucción estructural del OG y mejora sus propiedades electrónicas. Este fenómeno resulta particularmente relevante para aplicaciones que requieren alta conductividad y menor densidad de defectos.

Además, algunos estudios reportan que los plasmas de hidrocarburos pueden generar recubrimientos delgados de tipo carbono amorfo o grafitico sobre la superficie del OG, modificando sus propiedades tribológicas, eléctricas y químicas.

Sin embargo, el control preciso de la incorporación de carbono continúa siendo un desafío importante, debido a la complejidad de los mecanismos de deposición y crecimiento superficial asociados al plasma.

4.6 COMPARACIÓN ENTRE TIPOS DE PLASMA

La modificación superficial mediante plasma ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades fisicoquímicas de materiales carbonosos, debido a la diversidad de mecanismos que pueden inducirse según el gas empleado (Awaja et al., 2018; Wang et al., 2016). En la tabla 2



se presenta una comparación de los principales tipos de plasma utilizados, considerando su efecto dominante, beneficios, desventajas y aplicaciones más relevantes.

Tabla 2. Comparación de los principales tipos de plasma.

Plasma	Efecto dominante	Ventajas	desventajas	Aplicaciones
H ₂	Reducción	Incrementa conductividad	Puede generar defectos	Sensores, electrónica
Ar	Bombardeo iónico	Activación superficial	Daño estructural	Emisión de campo
O ₂	Funcionalización	Mayor humectabilidad	Sobreoxidación	Biomateriales
N ₂ /NH ₃	Dopaje	Mejora catalítica	Control complejo	Catálisis
CH ₄	Reparación estructural	Reconstrucción sp ²	Baja uniformidad	Electrónica

5. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL OG MODIFICADO

La caracterización estructural, química y morfológica del óxido de grafeno modificado mediante plasma es fundamental para comprender los cambios inducidos durante el tratamiento y establecer relaciones entre los parámetros de procesamiento y las propiedades finales del material. Debido a la complejidad de los mecanismos plasma-superficie, normalmente se requiere el uso complementario de múltiples técnicas analíticas capaces de evaluar la composición química, la densidad de defectos, la morfología, la rugosidad y las propiedades eléctricas.

5.1 ESPECTROSCOPÍA RAMAN

La espectroscopía Raman es una de las técnicas más utilizadas para analizar defectos estructurales y dominios sp² en materiales basados en grafeno (Xiang et al., 2022). Esta técnica proporciona información relevante acerca del orden cristalino, densidad de defectos y grado de restauración electrónica inducida por tratamientos de plasma.

En materiales derivados de grafeno, las bandas Raman más importantes son la D ($\sim 1350\text{ cm}^{-1}$), asociada a defectos estructurales y desorden, y la G ($\sim 1580\text{ cm}^{-1}$), relacionada con vibraciones de carbonos sp². La relación de



intensidades ID/IG se emplea ampliamente para evaluar el grado de defectos generado o eliminado durante el tratamiento por plasma.

Tratamientos reductores con H_2 suelen disminuir parcialmente la relación ID/IG debido a la restauración de dominios grafiticos, mientras que plasmas más energéticos o procesos de sputtering pueden incrementar significativamente la densidad de defectos (Kondratowicz et al., 2018; Raza et al., 2021).

Asimismo, desplazamientos en la posición de las bandas Raman pueden indicar tensiones estructurales, dopaje heteroatómico o modificaciones electrónicas inducidas por el plasma.

5.2 ESPECTROSCOPÍA FOTOELECTRÓNICA DE RAYOS X (XPS)

La espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) permite cuantificar grupos funcionales y determinar la composición química superficial, incluyendo niveles de dopaje con nitrógeno u oxígeno (El-Hossary et al., 2021).

Debido a que XPS es altamente sensible a la superficie, esta técnica resulta particularmente útil para estudiar modificaciones inducidas por plasma, que generalmente ocurren en los primeros nanómetros del material.

El análisis de los espectros C 1s permite identificar enlaces C–C, C–O, C=O y O–C=O, mientras que los espectros N 1s permiten diferenciar configuraciones nitrogenadas, como nitrógeno piridínico, pirrónico y grafitico, en materiales dopados.

La reducción del OG mediante plasma suele traducirse en una disminución de la relación O/C, lo que indica la eliminación de grupos oxigenados y la restauración parcial de la red conjugada (Raza et al., 2021).

Además, XPS permite evaluar la eficiencia de la funcionalización superficial, la incorporación de heteroátomos y la estabilidad química después del tratamiento.

5.3 FTIR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se utiliza para identificar grupos funcionales superficiales, como hidroxilos, carbonilos y epóxidos (Jaramillo-Fierro & Cuenca, 2024).



Esta técnica resulta especialmente útil para monitorear cambios químicos inducidos por plasma, ya que las variaciones en la intensidad o desaparición de bandas características permiten identificar procesos de reducción o funcionalización.

Por ejemplo, los tratamientos reductores disminuyen la intensidad de las bandas asociadas a grupos oxigenados, mientras que los plasmas oxidativos pueden incrementar las señales relacionadas con enlaces C–O y O–H.

Asimismo, la FTIR permite evaluar interacciones químicas entre el OG tratado y otras moléculas, polímeros o biomateriales en aplicaciones compuestas y biomédicas.

5.4 SEM/TEM

La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM) permiten evaluar la morfología superficial, los defectos y los cambios estructurales inducidos por plasma (Awaja et al., 2018).

SEM proporciona información sobre la rugosidad superficial, la aglomeración de láminas y los cambios morfológicos ocasionados por procesos de grabado o sputtering. En muchos casos, tratamientos de plasma generan superficies más rugosas y activadas, lo cual incrementa el área superficial efectiva.

Por otra parte, TEM permite observar directamente defectos, bordes, vacancias y reorganización de dominios cristalinos a escala nanométrica.

En tratamientos agresivos, la TEM puede evidenciar fragmentación parcial de las láminas de OG y aumento de la densidad de defectos, mientras que tratamientos controlados pueden favorecer la restauración parcial de regiones gráficas (Baraket et al., 2016).

5.5 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA (AFM)

La microscopía de fuerza atómica (AFM) proporciona información detallada sobre la rugosidad superficial, el espesor y la distribución topográfica de las láminas de OG. Esta técnica resulta particularmente útil para evaluar cambios morfológicos inducidos por plasma a escala nanométrica, lo que permite identificar fenómenos de grabado, exfoliación, fragmentación o deposición superficial posteriores al tratamiento. Las variaciones en la rugosidad y el

espesor se relacionan directamente con modificaciones en la energía superficial, la adhesión celular y el transporte electrónico, aspectos relevantes en aplicaciones biomédicas y electrónicas (Alam et al., 2020; Awaja et al., 2018; Johnson et al., 2023).

5.6 MEDIDAS ELÉCTRICAS Y ÁNGULO DE CONTACTO

Las mediciones eléctricas permiten analizar cambios en la conductividad y la resistencia superficial, mientras que el ángulo de contacto evalúa modificaciones en la humectabilidad y la energía superficial (Alam et al., 2020; Fraih & Mutlaq, 2021). La reducción del OG mediante plasma normalmente produce incrementos significativos en conductividad eléctrica debido a la restauración parcial de dominios sp^2 y disminución de grupos oxigenados aislantes; en contraste, tratamientos oxidativos pueden incrementar la resistencia superficial debido al aumento de grupos funcionales y defectos estructurales (Pei & Cheng, 2012; Raza et al., 2021).

Por otra parte, las mediciones de ángulo de contacto permiten evaluar cambios en la hidrofiliidad superficial, ya que plasmas oxidativos generalmente disminuyen el ángulo de contacto e incrementan la afinidad con agua y biomoléculas. Estas propiedades resultan fundamentales en aplicaciones de membranas, biomateriales y sensores, donde la interacción interfacial desempeña un papel crítico (El-Hossary et al., 2021; Tabarsa & ZareNezhad, 2021; Zhang et al., 2025).

6. RELACIÓN ENTRE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL Y PROPIEDADES

Las modificaciones inducidas por plasma en el OG generan cambios significativos en las propiedades estructurales, electrónicas, químicas y superficiales. La naturaleza de estas modificaciones depende directamente del tipo de plasma utilizado y de los parámetros operativos empleados durante el tratamiento.

6.1 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La reducción de grupos oxigenados mediante plasma favorece la restauración parcial de dominios sp^2 y el incremento de la conductividad eléctrica (Pei & Cheng, 2012; Raza et al., 2021).

En materiales basados en OG, los grupos funcionales oxigenados interrumpen la conjugación electrónica y limitan el transporte de carga. Por ello, tratamientos reductores, como el plasma de H_2 o de Ar, contribuyen a recuperar parcialmente la movilidad electrónica del material.

Diversos estudios reportan incrementos de varios órdenes de magnitud en la conductividad eléctrica tras el tratamiento con plasma, particularmente en sistemas de RF (radiofrecuencia) y de baja presión (Fraih & Mutlaq, 2021).

Sin embargo, la mejora en la conductividad debe balancearse cuidadosamente con la generación de defectos estructurales, ya que exposiciones excesivas pueden deteriorar el transporte electrónico.

6.2 DENSIDAD DE DEFECTOS

Los tratamientos con plasma pueden incrementar los defectos estructurales según la potencia y el tiempo de exposición (Kondratowicz et al., 2018).

La generación de defectos ocurre principalmente mediante el bombardeo iónico, el sputtering y la ruptura de enlaces químicos superficiales. Estos defectos incluyen vacancias, bordes expuestos y regiones amorfas.

Aunque una elevada densidad de defectos puede afectar negativamente las propiedades electrónicas, también puede resultar beneficiosa para aplicaciones catalíticas y de sensores debido al aumento de sitios activos superficiales.

El control preciso de la densidad de defectos constituye uno de los principales desafíos de la ingeniería de superficies basada en plasma.

6.3 ENERGÍA SUPERFICIAL

La incorporación de grupos funcionales modifica significativamente la energía superficial y la interacción con fluidos o biomoléculas (El-Hossary et al., 2021).

Los tratamientos oxidativos incrementan los grupos polares superficiales, favoreciendo la humectabilidad, la adhesión interfacial y la estabilidad coloidal, aspectos fundamentales en membranas, recubrimientos funcionales y materiales biomédicos. En contraste, los tratamientos reductores disminuyen parcialmente la hidrofiliidad debido a la eliminación de grupos oxigenados, modificando la dispersabilidad y la compatibilidad con matrices poliméricas (Awaja et al., 2018; Tabarsa & ZareNezhad, 2021; Zhang et al., 2025).

6.4 BIOCOMPATIBILIDAD

Los tratamientos oxidativos y atmosféricos favorecen una mayor compatibilidad celular y adhesión biológica (Alam et al., 2020). La incorporación controlada de grupos funcionales oxigenados mejora la interacción con proteínas, biomoléculas y tejidos biológicos, lo que favorece su aplicación en ingeniería tisular, en biosensores y en sistemas de liberación controlada de fármacos. Asimismo, la modificación superficial mediante plasma permite reducir contaminantes químicos asociados a métodos tradicionales de funcionalización, mejorando la estabilidad biológica y la respuesta celular; sin embargo, una elevada densidad de defectos o de residuos reactivos podría inducir efectos citotóxicos, dependiendo de las condiciones de tratamiento empleadas (Alam et al., 2020; Awaja et al., 2018; Navas-Pinto et al., 2025).

6.5 ACTIVIDAD CATALÍTICA

El dopaje con nitrógeno y la generación controlada de defectos incrementan la actividad catalítica en reacciones electroquímicas (Jafari et al., 2022; Wang et al., 2016). Los defectos estructurales y heteroátomos introducidos mediante plasma actúan como sitios activos capaces de favorecer la adsorción y la transferencia de electrones durante procesos catalíticos, particularmente en las reacciones ORR y HER relacionadas con celdas de combustible y la electrólisis del agua. Asimismo, el control de los defectos y de la funcionalización superficial permite optimizar selectividad, estabilidad catalítica y eficiencia electroquímica, favoreciendo el desarrollo de electrocatalizadores libres de metales nobles basados en OG modificado por plasma (Dey et al., 2020; Jafari et al., 2022; Johnson et al., 2023).



7. APLICACIONES DEL OG MODIFICADO POR PLASMA

La modificación superficial del OG mediante plasma ha permitido ampliar significativamente sus aplicaciones tecnológicas gracias a la capacidad de ajustar de manera controlada sus propiedades electrónicas, químicas y superficiales.

7.1 SENSORES

La modificación superficial mediante plasma permite mejorar la sensibilidad, la selectividad y la estabilidad en sensores químicos y electroquímicos (Kurtishaj Hamzaj et al., 2024). La generación de defectos, la incorporación de grupos funcionales y el dopaje heteroatómico incrementan la interacción entre la superficie del OG y las especies químicas objetivo, favoreciendo procesos de adsorción y transferencia electrónica. Gracias a estas propiedades, los materiales basados en OG tratado por plasma han mostrado aplicaciones prometedoras en sensores para aplicaciones ambientales y biomédicas, así como en sensores de gases como NH_3 , NO_2 y O_2 (Fraih & Mutlaq, 2021; Wang et al., 2016).

7.2 ELECTRÓNICA FLEXIBLE

La restauración parcial de la red sp^2 incrementa la conductividad y favorece su aplicación en dispositivos flexibles (Dey et al., 2020). Los tratamientos por plasma permiten obtener películas conductoras con elevada flexibilidad, estabilidad mecánica y buena transparencia óptica, características fundamentales en dispositivos electrónicos flexibles y optoelectrónicos. Además, la modificación controlada de la función de trabajo y densidad electrónica permite optimizar el transporte de carga en transistores flexibles, electrodos transparentes y dispositivos wearables (Johnson et al., 2023; Politano & Versace, 2022).

7.3 MEMBRANAS Y SEPARACIÓN

Los cambios en la humectabilidad y la funcionalización permiten controlar la permeabilidad y la selectividad (Jafari et al., 2022; Zhang et al., 2025). La modificación superficial inducida por plasma permite ajustar el tamaño de poro, la interacción molecular y el transporte selectivo de especies químicas,

propiedades particularmente relevantes en la separación de gases, la purificación de agua y las membranas industriales. Asimismo, el incremento de la estabilidad química y de la dispersabilidad superficial favorece la integración del OG modificado en membranas compuestas y sistemas avanzados de filtración (Tabarsa & ZareNezhad, 2021).

7.4 BIOMEDICINA

Los tratamientos por plasma mejoran la interacción celular, la biocompatibilidad y la funcionalización biomolecular (Alam et al., 2020). La incorporación controlada de grupos funcionales favorece la adhesión celular, la inmovilización de biomoléculas y la compatibilidad con tejidos biológicos, lo que permite aplicaciones en ingeniería tisular, biosensores, liberación controlada de fármacos y recubrimientos antibacterianos. Además, la posibilidad de modificar superficialmente el OG sin recurrir a reactivos químicos tóxicos representa una ventaja importante frente a métodos convencionales (Awaja et al., 2018; Navas-Pinto et al., 2025).

7.5 ENERGÍA Y CATÁLISIS

Los materiales modificados por plasma muestran aplicaciones prometedoras en supercapacitores, en la ORR (reacción de reducción de oxígeno), en la HER (reacción de evolución de hidrógeno) y en la reducción electroquímica de CO_2 (Wang et al., 2016; Jafari et al., 2022). El incremento de defectos controlados y el dopaje heteroatómico favorecen procesos de transferencia electrónica, actividad electrocatalítica y estabilidad electroquímica, mejorando el desempeño en sistemas de almacenamiento y conversión energética. Asimismo, el desarrollo de electrocatalizadores basados en OG dopado mediante plasma representa una alternativa prometedora para tecnologías energéticas sostenibles y dispositivos electroquímicos avanzados (Dey et al., 2020; Johnson et al., 2023).

8. LIMITACIONES Y DESAFÍOS ACTUALES

A pesar de sus ventajas, los tratamientos con plasma presentan diversas limitaciones técnicas y científicas. Uno de los principales desafíos es el daño estructural excesivo causado por el bombardeo iónico prolongado, que puede



deteriorar la red cristalina del OG y afectar sus propiedades electrónicas (Kondratowicz et al., 2018).

Asimismo, la reproducibilidad entre sistemas de plasma continúa siendo limitada debido a diferencias en la geometría de los reactores, la potencia, la presión y la composición gaseosa (Wang et al., 2016).

La escalabilidad industrial también representa un reto importante, particularmente en sistemas de vacío de gran superficie. Además, algunos procesos presentan costos operativos elevados asociados al consumo energético y al control atmosférico.

Otro desafío relevante es el control fino del dopaje y la funcionalización superficial, especialmente cuando se busca uniformidad química en aplicaciones electrónicas o biomédicas.

9. TENDENCIAS FUTURAS

Las investigaciones recientes muestran un creciente interés en sistemas de plasma atmosférico continuo debido a su potencial de escalabilidad y menor costo operativo.

Asimismo, los procesos roll-to-roll representan una alternativa prometedora para la producción industrial de materiales basados en grafeno superficialmente modificados.

Otra tendencia emergente es el desarrollo de plasmas híbridos, capaces de combinar reducción, dopaje y funcionalización en un único proceso.

La integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático para optimizar parámetros del plasma también está adquiriendo relevancia, lo que permite correlacionar las condiciones de operación con las propiedades finales del material (Johnson et al., 2023).

Finalmente, el uso de heteroestructuras 2D híbridas basadas en OG y otros materiales bidimensionales abre nuevas oportunidades en el ámbito de la energía, la fotónica y la nanoelectrónica.

CONCLUSIONES

Los tratamientos con plasma constituyen una herramienta versátil y altamente controlable para modificar la superficie del óxido de grafeno.

A lo largo de esta revisión se estableció una relación clara entre el tipo de plasma empleado, los cambios en la química superficial y las propiedades resultantes del material. Se identificó que los plasmas reductores favorecen la eliminación de grupos oxigenados y el incremento de la conductividad eléctrica, mientras que los plasmas reactivos permiten la incorporación controlada de grupos funcionales y heteroátomos.

Asimismo, se evidenció un compromiso entre la reducción del material y la generación de defectos, aspecto que debe controlarse cuidadosamente según la aplicación final.

Finalmente, las tendencias emergentes relacionadas con plasma atmosférico, inteligencia artificial y manufactura continua posicionan a esta tecnología como una alternativa prometedora para el desarrollo de materiales avanzados.

REFERENCIAS

- Alam, K., Jo, Y. Y., Park, C.-K., & Cho, H. (2020). Synthesis of graphene oxide using atmospheric plasma for prospective biological applications. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 5813–5824. <https://doi.org/10.2147/IJN.S254860>
- Awaja, F., Tripathi, M., Wong, T. T., O'Brien, T., & Speranza, G. (2018). The chemistry and topography of stabilized and functionalized graphene oxide coatings. *Plasma Processes and Polymers*, 15(10), 1800084. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800084>
- Baraket, M., Boris, D. R., Wei, Z., Sheehan, P. E., & Walton, S. G. (2016). *On the significance of a carbon-rich background in plasma-based graphene oxide reduction* (Report No. NRL/MR/6750--16-9682). Naval Research Laboratory.
- Boulos, M. I., Fauchais, P. L., & Pfender, E. (2023). The plasma state. En M. I. Boulos, P. L. Fauchais, & E. Pfender (Eds.), *Handbook of thermal plasmas* (pp. 3–55). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84936-8_1

- Dey, A., Ghosh, P., Bowen, J., Braithwaite, N. St. J., & Krishnamurthy, S. (2020). Engineering work function of graphene oxide from p to n type using a low power atmospheric pressure plasma jet. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(15), 7685–7698. <https://doi.org/10.1039/C9CP06174F>
- El-Hossary, F. M., Ghitas, A., Abd El-Rahman, A. M., Ebnalwaled, A. A., Shahat, M. A., & Fawey, M. H. (2021). Cold RF oxygen plasma treatment of graphene oxide films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(12), 15718–15731. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06123-x>
- Fraih, A. J., & Mutlaq, H. M. (2021). Controlled reduction of graphene oxide via hydrogen plasma for tuning sensitivity and recovery time of rGo based oxygen gas sensor. *The European Physical Journal Applied Physics*, 95(3), 30101. <https://doi.org/10.1051/epjap/2021210108>
- Jafari, A., Mortaheb, H. R., & Gallucci, F. (2022). Plasma treatment for enhanced functionalization of graphene nanosheets by octadecylamine. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.054>
- Jaramillo-Fierro, X., & Cuenca, G. (2024). Theoretical and experimental analysis of hydroxyl and epoxy group effects on graphene oxide properties. *Nanomaterials*, 14(8), 714. <https://doi.org/10.3390/nano14080714>
- Johnson, T., Wang, K., Fan, Q. H., & Lee, A. (2023). Plasma modification of graphene nanoplatelets surfaces. *Discover Nano*, 18(1), 144. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03929-y>
- Kondratowicz, I., Nadolska, M., Şahin, S., Łapiński, M., Przeźniak-Welenc, M., Sawczak, M., Yu, E. H., Sadowski, W., & Żelechowska, K. (2018). Tailoring properties of reduced graphene oxide by oxygen plasma treatment. *Applied Surface Science*, 440, 651–659. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.168>
- Kurtishaj Hamzaj, A., Donà, E., Santhosh, N. M., Shvalya, V., Košiček, M., & Cvelbar, U. (2024). Plasma-modification of graphene oxide for advanced ammonia sensing. *Applied Surface Science*, 660, 160006. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160006>
- Mancera Zapata, D. L., & Morales Narváez, E. (2023). A biosensing platform based on graphene oxide and photoluminescent probes: Advantages and perspectives. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(31), 1e–12e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.31.69798>
- Navas-Pinto, W., Cree, D. E., Wilson, L. D., Barrionuevo, G. O., Sánchez-Sánchez, X., & Calvopiña, H. (2025). Characterization of graphene oxide synthesized through a modified Hummers method. *Ingenius*, (34), 31–42. <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.03>

- Pei, S., & Cheng, H.-M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210–3228. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010>
- Politano, G. G., & Versace, C. (2022). Electrical and optical characterization of graphene oxide and reduced graphene oxide thin films. *Crystals*, 12(9), 1312. <https://doi.org/10.3390/cryst12091312>
- Raza, M. M. H., Khan, S., Aalam, S. M., Sadiq, M., Sarvar, M., Zulfequar, M., Husain, S., & Ali, J. (2021). Study the electron field emission properties of plasma-based reduction of graphene oxide (GO): An ex-situ plasma approach. *Carbon Trends*, 5, 100127. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2021.100127>
- Tabarsa, M., & ZareNezhad, B. (2021). An eco-friendly air–water plasma surface treatment technique for improving the stability of graphene oxide nanosheets in aqueous solutions. *Materials Today Communications*, 26, 101940. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101940>
- Wang, X., Fan, Q., Chen, Z., Wang, Q., Li, J., Hobiny, A., Alsaedi, A., & Wang, X. (2016). Surface modification of graphene oxides by plasma techniques and their application for environmental pollution cleanup. *The Chemical Record*, 16(1), 295–318. <https://doi.org/10.1002/tcr.201500223>
- Xiang, X., Zhu, Y., Gao, C., Du, H., & Guo, C. (2022). Study on the structure of reduced graphene oxide prepared by different reduction methods. *Carbon Letters*, 32(2), 557–566. <https://doi.org/10.1007/s42823-021-00287-6>
- Zhang, P., Wang, Q., Zhang, Y., Lin, M., Zhou, X., David, A., Ustyuzhanin, A., Chen, M., Katsnelson, M. I., Trubyanov, M., Novoselov, K. S., & Andreeva, D. V. (2025). Strain-induced crumpling of graphene oxide lamellas to achieve fast and selective transport of H₂ and CO₂. *Nature Nanotechnology*, 20(9), 1254–1261. <https://doi.org/10.1038/s41565-025-01971-8>