



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

**EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE GRAFENO
DOPADO CON NITRÓGENO Y ÓXIDO DE GRAFENO EN LA
GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE RÁBANO (*Raphanus
sativus*).**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Agricultura Sustentable)

P r e s e n t a

Aidée Jazmín Anguiano Hernández

La Paz, Baja California Sur, abril de 2025.

ACTA DE LIBERACION DE TESIS

En la ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 9:00 horas del día 18 del mes de febrero del 2025, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"EFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE GRAFENO DOPADO CON NITRÓGENO Y DE ÓXIDO DE GRAFENO EN LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE RÁBANO (*Raphanus sativus*)"

Presentada por la alumna:

Aidée Jazmín Anguiano Hernández

Aspirante al Grado de MAESTRA EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN Agricultura Sustentable.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA


Dr. Luis Hernández Adame
Director de Tesis


Dr. Luis G. Hernández Montiel
Co-Tutor de Tesis


Dr. Felipe Barrera-Méndez
Co-Tutor de Tesis


Dr. Bernardo Murillo Amador
Co-Tutor de Tesis


Dra. Alejandra Nieto Garibay,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos.



La Paz, Baja California Sur, a 20 de febrero de 2025.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante Aidée Jazmín Anguiano Hernández del Programa de Maestría en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

iThenticate Página 2 of 120 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trmo:ii

- Herramienta antiplagio: iThenticate®
- Filtros utilizados:
 - Excluir citas.
 - Bibliografía.
 - Métodos y materiales.
 - Coincidencias inferiores a 10 palabras.
- Porcentajes de similitud: 14%
Se muestra captura de pantalla

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)
- Trabajos entregados

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 13% Fuentes de Internet
- 9% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda re

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin recomendamos que preste atención y la revise.

Dr. Luis Hernández Adame
Director de Tesis

Estudiante

Aidée Jazmín Anguiano Hernández

Personal técnico de asesoría en el análisis

Ana María Talamantes Cota



Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. Luis Hernández Adame
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Director de Tesis

Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutor de Tesis

Dr. Bernardo Murillo Amador
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutor de Tesis

Dr. Felipe Barrera Méndez
Instituto de Ecología, A.C. (INECOL)
Co-Tutor de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. Luis Hernández Adame
Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel
Dr. Bernardo Murillo Amador
Dr. Felipe Barrera Méndez

Jurado de Examen

Dr. Luis Hernández Adame
Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel
Dr. Felipe Barrera Méndez

Suplente

Dr. Bernardo Murillo Amador

Resumen

Se evaluó el impacto del óxido de grafeno (OG) y el óxido de grafeno dopado con nitrógeno (OGN) en el desarrollo y germinación del rábano (*Raphanus sativus*). Se realizaron ensayos controlados aplicando diversas concentraciones de OG y OGN (0.5, 1, 2 y 2.5 mg L⁻¹) para determinar sus efectos en variables fisiológicas, bioquímicas y morfométricas. Los resultados indican que, concentraciones bajas (0.5 y 1 mg L⁻¹) de OG y OGN tienen un efecto positivo significativo, mejorando la tasa de germinación, la longitud de las raíces y el índice de clorofila en comparación con el control. Estos hallazgos sugieren que, a estas dosis, las nanopartículas pueden actuar como estimulantes, promoviendo procesos metabólicos que favorecen el crecimiento sin causar efectos adversos. El OGN, en particular, demostró un mayor potencial en dosis bajas y, además disminuyó el efecto fitotóxico en comparación con OG. Los análisis bioquímicos revelaron que, el OGN permite mantener niveles de carbohidratos y proteínas similares o superiores al control en ciertas concentraciones, destacando su capacidad para activar rutas metabólicas clave. En contraste, concentraciones más altas (2 y 2.5mg L⁻¹) de OG y OGN mostraron efectos negativos, como la reducción en la longitud y área de las raíces y la disminución en la absorción de nutrientes esenciales como el potasio, evidenciando un estrés oxidativo asociado. Estos resultados aportan información valiosa para la aplicación de nanotecnología en cultivos agrícolas, considerando la potencial toxicidad en concentraciones elevadas y la importancia de ajustar las dosis para cada cultivo específico.

Palabras clave: Óxido de grafeno, dopaje con nitrógeno, estimulantes, nanotecnología agrícola, germinación de rábano.

ORCID: 0009-0005-5751-7005

Vo.Bo. Director de Tesis



Dr. Luis Hernández Adame

Summary

The impact of graphene oxide (GO) and nitrogen-doped graphene oxide (N-GO) on the development and germination of radish (*Raphanus sativus*) was evaluated. Controlled experiments were conducted applying different concentrations of GO and N-GO (0.5, 1, 2, and 2.5 mg L⁻¹) to determine their effects on physiological, biochemical, and morphometric variables. The results indicate that low concentrations (0.5 and 1 mg L⁻¹) of GO and N-GO have a significant positive effect, improving the germination rate, root length, and chlorophyll index compared to the control. These findings suggest that, at these doses, the nanoparticles may act as biostimulants, promoting metabolic processes that enhance growth without causing adverse effects. N-GO demonstrated greater potential at low doses, reducing phytotoxic effects compared to GO. Biochemical analyses revealed that N-GO maintains carbohydrate and protein levels similar to or higher than the control at certain concentrations, highlighting its ability to activate key metabolic pathways. In contrast, higher concentrations (2 and 2.5 mg L⁻¹) of GO and N-GO showed negative effects, such as reduced root length and area, and a decrease in the absorption of essential nutrients like potassium, indicating associated oxidative stress. These results provide valuable insights into the application of nanotechnology in agricultural crops, considering the potential toxicity at higher concentrations and the importance of dose adjustment for each specific crop.

Keywords: Graphene oxide, nitrogen doping, stimulants, agricultural nanotechnology, radish germination.

ORCID: 0009-0005-5751-7005

Vo.Bo. Director de Tesis

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luis Hernández Adame', is written over a solid horizontal line.

Dr. Luis Hernández Adame

Dedicatoria

A mi familia y mis seres queridos, por su apoyo incondicional y compañía siempre.

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR), por brindarme la oportunidad de ser parte de la Maestría en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales. Su respaldo ha sido clave para mi desarrollo académico y profesional en el ámbito de la investigación científica.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca No. 1244623, que me permitió llevar a cabo mis estudios de Posgrado y avanzar en mi formación como Investigadora. Al Consejo Sudcaliforniano de Ciencia y Tecnología por el apoyo del proyecto CAR-25-2024 para el desarrollo de materiales avanzados con enfoque al sector agrícola.

A mi Comité Tutorial, conformado por el Dr. Luis Hernández Adame (Director de Tesis, CIBNOR), el Dr. Luis G. Hernández Montiel (CIBNOR), el Dr. Bernardo Murillo Amador (CIBNOR) y el Dr. Felipe Barrera Méndez (INECOL), por su guía constante, su disposición para compartir su conocimiento y su invaluable apoyo durante todo este proceso. Su experiencia y compromiso han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

Extiendo mi agradecimiento al personal y equipo de los laboratorios de Bioquímica Fisiológica, Espectrofotometría de Absorción Atómica, Fisiotecnia Vegetal, Nanotecnología y Biocontrol Microbiano y Fitopatología, especialmente a, López García Magdalena, Mercado Guido María del Carmen, Peña Armenta Francisca Griselda, Zúñiga Mayoral Emerson Carlo, Elías Castelo Jessica Guadalupe, Ramos Galván María Sofía por su colaboración en el desarrollo de los análisis requeridos para este estudio. Su experiencia técnica y disposición fueron esenciales para la obtención de resultados de calidad. De igual manera, agradezco a los técnicos del campo agrícola, Briseño Ruiz Saúl Edel, Díaz Ramírez Miguel, Luna García Pedro, Melero Astorga José Manuel por su apoyo en las actividades prácticas, cuya contribución fue invaluable para el éxito del proyecto. Agradezco además al Dr. Issac Mata Cruz por proporcionar material para este trabajo de investigación.

A mis papás, quienes han sido mi mayor apoyo y mi constante fuente de inspiración; gracias por siempre creer en mí y motivarme a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. A mi familia por su amor incondicional y por estar siempre a mi lado, incluso en la distancia.

A mis amigos en Xalapa y en La Paz, por apoyarme a lo largo de esta etapa tan importante aún en la distancia. En especial, a Erick, Angie, Mariana, Pau, Valeria y Hazue, por estar siempre presentes y ser un pilar fundamental en mi vida. A Garu, por ser mi familia y mi mayor motivación. Y a Jona, por su inquebrantable apoyo en la salud y la enfermedad, por brindarme calma y fortaleza en cada paso de este camino.

Finalmente, al personal de la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos, en particular a la Dra. Alejandra Nieto Garibay, Directora de Posgrado, a Tania Verónica Núñez Valdez, Asistente Técnica del Depto. de Control Escolar, a Horacio Sandoval Gómez, responsable del Laboratorio de Cómputo, a la Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro y a la Mtra. Osvelia Ibarra Morales, por su apoyo constante y seguimiento en mis actividades académicas. Su dedicación ha sido esencial para la culminación de esta etapa académica.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xii
Lista de Abreviaturas	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1 La nanotecnología	4
2.2 Nanotecnología en la agricultura	5
2.2.1 Definición y principios de la nanotecnología en la agricultura	5
2.2.2 Aplicaciones de nanomateriales en la agricultura	6
2.2.3 Beneficios y desafíos de la nanotecnología en la agricultura	8
2.3 Propiedades y usos del óxido de grafeno (OG) y del óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG)	9
2.3.1 Óxido de Grafeno (OG)	9
2.3.2 Aplicaciones agrícolas del OG	12
2.3.3 Dopaje del óxido de grafeno con nitrógeno (NOG)	14
2.3.4 Comparación entre OG y NOG en aplicaciones agrícolas	15
2.4 Impacto de las nanopartículas de grafeno en las plantas	17
2.5 El rábano (<i>Raphanus sativus</i>)	19
2.5.1 cultivo y propiedades nutricionales	19
2.5.2 El rábano como planta modelo en estudios de nanotecnología	20
2.5.3 Nanopartículas de carbono en el crecimiento y desarrollo del rábano	22
3. JUSTIFICACIÓN	24
4. HIPÓTESIS	25
5. OBJETIVOS	26
5.1 Objetivo general	26
5.2 Objetivos particulares	26
6. MATERIAL Y MÉTODOS	27
6.1 Obtención y preparación de nanopartículas	27
6.1.1 Óxido de grafeno (OG)	27
6.1.2 Síntesis de óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG)	27
6.2 Caracterización de las nanopartículas	28
6.2.1 Medición de láminas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno	29
6.3 Material vegetal y tratamientos	29
6.4 Prueba de germinación	30
6.5 Cultivo de plantas en invernadero	31
6.6 Evaluación de variables fisiológicas y morfométricas	32
6.6.1 Peso fresco y seco de hojas y bulbo	32

6.6.2 Área foliar, número de hojas y altura de la planta	33
6.6.3 Tasa de fotosíntesis y transpiración	33
6.6.4 Índice de clorofila	33
6.7 Análisis bioquímico.....	33
6.7.1 Carbohidratos totales.....	34
6.7.2 Proteínas totales	34
6.7.3 Lípidos totales	34
6.8 Espectrofotometría de absorción atómica	34
6.9 Análisis estadístico	34
7. RESULTADOS.....	35
7.1 Caracterización de óxido de grafeno y sus modificaciones	35
7.1.1 Caracterización UV-Vis de óxido de grafeno y sus modificaciones.....	35
7.1.2 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)	36
7.1.3 Difracción de rayos X (XRD).....	37
7.1.4 Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS).....	38
7.1.5 Caracterización morfológica y medición del tamaño de láminas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno.....	40
7.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la germinación de rábano	41
7.2.1 Velocidad y porcentaje de germinación de semillas de rábano bajo tratamientos con óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno	41
7.2.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de la raíz al tercer día de germinación	43
7.2.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno el área de la raíz al tercer día de germinación	46
7.2.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz al tercer día de germinación	47
7.2.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud por volumen de la raíz al tercer día de germinación	48
7.2.6 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de la raíz al cuarto día de germinación	49
7.2.7 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área de la raíz al cuarto día de germinación	50
7.2.8 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz al cuarto día de germinación	51
7.2.9 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz al cuarto día de germinación	52
7.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico al cuarto día de germinación de rábano	53
7.3.1 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de carbohidratos totales al cuarto día de germinación	53
7.3.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de proteínas totales al cuarto día de germinación	54

7.3.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de lípidos totales al cuarto día de germinación	56
7.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en las variables fisiológicas y morfométricas.....	57
7.4.1 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la altura de la planta.....	57
7.4.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el número de hojas	58
7.4.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área foliar	59
7.4.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro del rábano	60
7.4.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud del rábano	61
7.4.6 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco del rábano	62
7.4.7 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco de las hojas de rábano.....	62
7.4.8 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el índice de clorofila de las hojas de rábano	64
7.4.9 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la tasa de fotosíntesis neta.....	65
7.4.10 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la tasa de transpiración	66
7.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico y de espectrofotometría de absorción atómica en el rábano	68
7.5.1 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de carbohidratos en rábano.....	68
7.5.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de proteínas totales en rábano	69
7.5.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de lípidos totales en rábano.....	70
7.5.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de potasio en rábano	71
7.5.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de calcio en rábano	72
8. DISCUSIÓN.....	74
8.1 Caracterización de óxido de grafeno y sus modificaciones	74
8.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la germinación de rábano	75
8.2.1 Comparación de velocidad y porcentaje de germinación.....	75
8.2.2 Moderación del efecto negativo del OG mediante el dopaje con nitrógeno	77
8.2.3 Influencia en el crecimiento radicular y otras características morfométricas.....	77

8.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico al cuarto día de germinación de rábano	78
8.3.1 Carbohidratos totales.....	78
8.3.2 Proteínas totales	78
8.3.3 Lípidos totales	78
8.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en las variables fisiológicas y morfométricas.....	79
8.4.1 Efecto en la altura de la planta	79
8.4.2 Efecto en el número de hojas	79
8.4.3 Efecto en el área foliar	79
8.4.4 Efecto en el diámetro y longitud del bulbo.....	80
8.4.5 Efecto en el peso fresco y seco de las hojas y del bulbo.....	80
8.4.6 Efecto en el índice de clorofila	80
8.4.7 Efecto en la tasa de fotosíntesis neta	80
8.4.8 Efecto en la tasa de transpiración	81
8.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico y de espectrofotometría de absorción atómica en el rábano	81
8.5.1 Efecto en la cantidad de carbohidratos totales	81
8.5.2 Efecto en la cantidad de proteínas totales	81
8.5.3 Efecto en la cantidad de lípidos totales	82
8.5.4 Efecto en la cantidad de potasio	82
8.5.5 Efecto en la cantidad de calcio.....	82
9. CONCLUSIONES.....	83
10. LITERATURA CITADA	85

Lista de figuras

Figura 1. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura.....	7
Figura 2. Estructura del grafeno, óxido de grafeno, óxido de grafeno reducido y óxido de grafeno dopado con nitrógeno.....	10
Figura 3. Métodos de producción de OG a) Método por oxidación química, b) Método de exfoliación electroquímica y c) Método de exfoliación en fase líquida.....	12
Figura 4. Síntesis de óxido de grafeno dopado con nitrógeno.	28
Figura 5. Montaje de la prueba de germinación.....	31
Figura 6. Montaje del cultivo de rábano en invernadero.	32
Figura 7. Análisis Comparativo de los espectros UV-Vis de óxido de grafeno, óxido de grafeno dopado con nitrógeno y óxido de grafeno reducido.	35
Figura 8. Análisis FTIR de las transformaciones químicas en óxido de grafeno dopado con nitrógeno y reducido.	36
Figura 9. Análisis XRD de óxido de grafeno, dopado con nitrógeno y reducido. Cambios estructurales y cristalinidad.	37
Figura 10. Porcentaje atómico obtenido por XPS.	39
Figura 11. Dos imágenes de las láminas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno con presencia de una estructura multicapa.	40
Figura 12. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.	41
Figura 13. Curva acumulativa de germinación de las semillas de rábano expuestas a tratamiento con OG y OGN.....	42
Figura 14. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.....	44
Figura 15. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.	46
Figura 16. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.....	47
Figura 17. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud por volumen de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.	48
Figura 18. Efecto del Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Dopado con Nitrógeno en la longitud de la Raíz de Plántulas de Rábano al cuarto día de germinación	49
Figura 19. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área de la raíz de plántulas de rábano al cuarto día de germinación.....	50
Figura 20. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz de plántulas de rábano al cuarto día de germinación.....	51
Figura 21. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en l longitud por volumen de la raíz de plántulas de rábano al cuarto día de germinación.....	52
Figura 22. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de carbohidratos del germinado de rábano al cuarto día de germinación.	53
Figura 23. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de proteínas del germinado de rábano al cuarto día de germinación.	54

Figura 24. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de lípidos del germinado de rábano al cuarto día de germinación.	56
Figura 25. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en altura de la planta de rábano	57
Figura 26. Efecto del Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Dopado con Nitrógeno número de hojas de la planta de rábano.	58
Figura 27. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno área foliar de la planta de rábano	59
Figura 28. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de rábano.	60
Figura 29. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de rábano.	61
Figura 30. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco del rábano.	62
Figura 31. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco de las hojas de rábano.....	62
Figura 32. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el índice de clorofila las hojas de rábano.	64
Figura 33. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la tasa de fotosíntesis neta.....	65
Figura 34. Efecto del Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Dopado con Nitrógeno en la tasa de transpiración.	66
Figura 35. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de carbohidratos en rábano.....	68
Figura 36. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de proteínas totales en rábano.....	69
Figura 37. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de lípidos totales en rábano.....	70
Figura 38. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de potasio en rábano.	71
Figura 39. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de calcio en rábano.	72

Lista de tablas

Tabla 1. Composición elemental del óxido de grafeno dopado con nitrógeno. Análisis XPS38

Tabla 2. índices de velocidad de germinación (IVG, GSI) y tasa media de germinación (MGR)...42

Lista de Abreviaturas

N:	Nitrógeno
NO ₃ ⁻ :	Nitrato
NH ₄ ⁺ :	Amonio
OG:	Óxido de Grafeno
NOG:	Óxido de Grafeno Dopado con Nitrógeno
ROS:	Especies Reactivas de Oxígeno
PMS:	Peroximonosulfato
IAA:	Ácido Indolacético
ABA:	Ácido Abscísico
NTCM:	Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiples
CO ₂ :	Dióxido de Carbono
OGR:	Óxido de Grafeno Reducido
FTIR:	Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier
UV-Vis:	Ultravioleta-Visible
Ca:	Calcio
K:	Potasio

1. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un elemento fundamental para la vida, ya que forma parte de muchas moléculas esenciales que dan origen a los ácidos nucleicos, ADN, proteínas y otros metabolitos necesarios para la síntesis y transferencia de energía (Milton y Minter, 2017). En la agricultura, el nitrógeno es indispensable para el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas, ya que su absorción se refleja directamente en el rendimiento y calidad de los cultivos. Este elemento desempeña un papel clave en diversos procesos bioquímicos y fisiológicos, como fotosíntesis, respiración celular y síntesis de clorofila y aminoácidos (Leghari et al., 2016). Las plantas absorben el nitrógeno principalmente en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), y la cantidad de nitrógeno requerido varía según las necesidades específicas de cada planta. Además, su absorción se ve afectada por diversas condiciones ambientales, como la salinidad, temperatura y tipo de suelo (Raab y Terry, 1994; Coraspe et al., 2009).

En este contexto, la optimización de la absorción y utilización del nitrógeno es un desafío fundamental en la agricultura moderna, especialmente ante la necesidad de aumentar la productividad agrícola para satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos. La agricultura convencional a menudo depende del uso intensivo de fertilizantes químicos, lo que no solo implica costos elevados para los productores, sino que también conlleva impactos negativos en el medio ambiente, como la contaminación del suelo y del agua, y la emisión de gases de efecto invernadero. Por esta razón, se hace necesario explorar tecnologías innovadoras que permitan una gestión más eficiente de los recursos y una agricultura más sostenible (Duan et al., 2016).

En este sentido, la nanotecnología ha emergido como una herramienta revolucionaria con un gran potencial para transformar la agricultura. La nanotecnología se define como el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, dispositivos y sistemas a través del control de la materia a escala nanométrica (Joshi et al., 2018), es decir, a una escala de 1 a 100 nanómetros (nanoescala). A esta escala, los materiales pueden exhibir propiedades físicas, químicas y biológicas únicas que no se observan en tamaños mayores, lo que permite el desarrollo de nuevas aplicaciones en diversos campos, incluida la agricultura (Bawa et al., 2005).

En el ámbito agrícola, la nanotecnología ofrece innovadoras soluciones para mejorar la eficiencia en la administración de nutrientes, pesticidas y otros compuestos bioactivos a las plantas. Por ejemplo, los nanofertilizantes que están formulados a base de nanopartículas de carbono, metálicas u óxidos metálicos, y que permiten la liberación controlada de nutrientes. Este hecho maximiza su disponibilidad para las plantas y minimiza el desperdicio, contribuyendo así a un uso más eficiente de los recursos y a un aumento en la productividad de los cultivos (Fincheira et al., 2021). Además, esta tecnología puede reducir la cantidad de fertilizantes necesarios, mitigando así los impactos ambientales asociados al uso excesivo de productos químicos en la agricultura.

La nanotecnología también permite el desarrollo de sistemas inteligentes de liberación de nutrientes, pesticidas y materiales genéticos, que promueven una fertilidad del suelo mejorada y una mayor tolerancia de las plantas a factores de estrés abiótico y biótico (Ali et al., 2021). Los nanosensores se utilizan en la agricultura de precisión para monitorear en tiempo real las condiciones del suelo, clima y estado de los cultivos, optimizando así el manejo de los insumos agrícolas y mejorando el rendimiento de los cultivos (Ali et al., 2021). Estos avances tecnológicos no solo permiten incrementar la eficiencia y sostenibilidad de la producción agrícola, sino que también facilitan la adaptación a los desafíos que presenta el cambio climático.

A pesar de las ventajas de la nanotecnología en la agricultura, su adopción generalizada enfrenta varios desafíos. La implementación de esta tecnología requiere superar barreras relacionadas con la seguridad regulatoria, la aceptación por parte del consumidor y la estandarización de prácticas para su uso seguro y efectivo (Parisi et al., 2015). Además, es crucial desarrollar normativas claras y realizar estudios exhaustivos que evalúen los posibles riesgos de los nanomateriales para garantizar su seguridad en el uso agrícola (Fincheira et al., 2021), se necesitan investigaciones adicionales para comprender mejor las interacciones complejas entre los nanomateriales y los sistemas biológicos, así como sus efectos a largo plazo en el medio ambiente y la salud humana.

Dentro de este marco, el uso de materiales como el grafeno y sus derivados, incluyendo el óxido de grafeno dopado con nitrógeno, ha demostrado ser particularmente prometedor (Chen et al., 2020). La modificación del óxido de grafeno mediante el dopaje con nitrógeno altera su estructura

de manera que mejora su capacidad para retener agua y facilita su interacción con las plantas (He et al., 2018). Estas modificaciones estructurales generan una mayor afinidad del material con las membranas celulares, permitiendo un intercambio más eficiente de sustancias vitales, lo que puede resultar en una mejor absorción de agua y elementos esenciales. Como resultado, las plantas muestran un crecimiento más robusto y una mayor calidad de los cultivos, debido a una disponibilidad optimizada de los recursos necesarios para su desarrollo. Estas propiedades del óxido de grafeno dopado con nitrógeno también pueden contribuir a mejorar la tolerancia de las plantas a condiciones de estrés abiótico, incrementando su productividad en distintos entornos agrícolas (Chen et al., 2020; Zhang et al., 2021; Liu et al., 2023).

El rábano (*Raphanus sativus*), se ha seleccionado como planta modelo para este estudio debido a su rápido ciclo de crecimiento, características morfométricas y su sensibilidad a diferentes tratamientos nutricionales, lo que permite evaluar eficazmente los efectos de nuevas tecnologías de fertilización (Nouri et al., 2017). Investigaciones previas han demostrado que el rábano responde positivamente a los tratamientos con materiales nanoestructurados, mostrando un aumento en la eficiencia de la fotosíntesis y en la resistencia a factores de estrés biótico y abiótico (Liu et al., 2023).

La aplicación de la nanotecnología en la agricultura representa una oportunidad innovadora para mejorar la eficiencia de la producción agrícola, optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental. No obstante, para su adopción efectiva, es necesario seguir investigando sus efectos y establecer las bases científicas que nos permitan conocer con precisión su impacto, estructurar los marcos regulatorios y fomentar la aceptación pública de esta tecnología. En este sentido, este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de nanopartículas de óxido de grafeno dopadas con nitrógeno en el cultivo de rábano, proporcionando así una comprensión más profunda de su potencial para mejorar la sostenibilidad y productividad agrícola.

2. ANTECEDENTES

2.1 La nanotecnología

La nanotecnología se define a partir del prefijo "nano", que proviene de la palabra griega "νάνος", cuyo significado es "enano" y, en términos técnicos, un nanómetro (nm) representa la mil millonésima parte de un metro. Esta tecnología abarca el diseño, producción, caracterización y aplicación de componentes, estructuras y sistemas a escala nanométrica, permitiendo fenómenos únicos y aplicaciones novedosas en diversas disciplinas (Bawa et al., 2005).

Las propiedades específicas de los materiales en la escala nanométrica o comúnmente llamada "nanoescala" (10^0 nm), derivan del tamaño y forma de la partícula, composición elemental y características superficiales, lo que les otorga características físicas, químicas y biológicas distintas de sus equivalentes a granel en la microescala o como moléculas individuales. Estas propiedades incluyen superficies más amplias que facilitan la reactividad química, así como efectos cuánticos, magnéticos, ópticos y eléctricos que no se observan en materiales de mayor tamaño (The Royal Society and the Royal Academy of Engineering, 2004; Waychunas et al., 2005).

Desde una perspectiva multidisciplinaria, la nanotecnología ofrece un gran potencial en numerosos campos como la medicina, energía, agricultura, alimentación e industria (Milojević, 2012). En el ámbito biológico, su impacto es particularmente significativo. En la biomedicina, ha revolucionado el diagnóstico y tratamiento de enfermedades mediante la interacción a nivel molecular entre dispositivos y tejidos, optimizando la administración de medicamentos y reduciendo los efectos adversos. Por ejemplo, el desarrollo de sensores biomédicos altamente sensibles y sistemas de liberación controlada de fármacos permite tratar enfermedades con mayor precisión y eficacia (Elcock, 2007).

En el sector agrícola, las aplicaciones de la nanotecnología han aumentado significativamente. En la literatura es común encontrar con mayor frecuencia trabajos relacionados a mejorar la seguridad y el valor nutricional de los cultivos mediante la entrega inteligente de compuestos

bioactivos y la detección temprana de contaminantes utilizando nanomateriales (Sozer y Kokini, 2009). Además, la nanotecnología desempeña un papel crucial en la protección ambiental a través del uso de nanocatalizadores y nano-reactores que facilitan la eliminación eficiente de contaminantes (Sunkar et al., 2023).

Por otro lado, en sectores como la energía, la informática y la producción de fármacos, la nanotecnología tiene aplicaciones igualmente importantes, como el almacenamiento de información, la producción y conversión de energía y el desarrollo de nuevos medicamentos (Waldner, 2008). Sin embargo, su relevancia biológica es particularmente destacable debido a su capacidad para mejorar la salud humana y la sostenibilidad agrícola, así como para mitigar los desafíos ambientales (Elcock, 2007; Babatunde et al., 2020).

2.2 Nanotecnología en la agricultura

2.2.1 Definición y principios de la nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología se refiere al diseño, síntesis, caracterización y aplicación de materiales y dispositivos a escalas nanométricas en el rango de 1 a 100 nanómetros. En la agricultura, esta tecnología emergente ofrece soluciones innovadoras para abordar desafíos críticos como el aumento de la productividad, la mejora de la eficiencia en el uso de recursos, el control de enfermedades y la sostenibilidad ambiental (Prasad et al., 2017).

La nanotecnología tiene el potencial de revolucionar el sector agrícola mediante la introducción de nuevas herramientas que permiten una administración más precisa y controlada de nutrientes, pesticidas y otros compuestos. Estas aplicaciones incluyen la mejora de la absorción de nutrientes por parte de las plantas, el desarrollo de tratamientos de semillas más efectivos, la estimulación de la germinación, el fomento del crecimiento vegetal, así como el tratamiento y detección de enfermedades, y el control de plagas mediante sistemas inteligentes de distribución (Parisi et al., 2015). Además, la nanotecnología permite la creación de nanoformulaciones de agroquímicos que mejoran la eficiencia de pesticidas y fertilizantes, reduciendo la cantidad requerida y

minimizando su impacto negativo en el medio ambiente. Por ejemplo, el uso de nanopesticidas y nanofertilizantes ayuda a reducir la contaminación del suelo y del agua al disminuir las pérdidas por lixiviación y emisiones de nutrientes no utilizados (Kim et al., 2018).

En términos de aplicaciones prácticas, los nanomateriales también se están utilizando para desarrollar sensores y dispositivos de diagnóstico que permiten monitorear en tiempo real las condiciones del suelo y del cultivo, facilitando la agricultura de precisión y mejorando la gestión del uso de insumos (Sekhon, 2014). Estos avances tecnológicos no solo permiten incrementar la eficiencia y sostenibilidad de la producción agrícola, sino que también facilitan la adaptación a los desafíos que presenta el cambio climático.

La introducción de estas tecnologías tiene como objetivo reducir los costos de producción y, potencialmente, aumentar la producción, beneficiando al agricultor y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles (Rickman et al., 2003). Sin embargo, el éxito de la implementación de la nanotecnología en la agricultura también dependerá de superar desafíos relacionados con la aceptación pública y la regulación de estos nuevos materiales, garantizando su seguridad y minimizando los riesgos potenciales para la salud humana y ambiental (Lavicoli et al., 2017).

2.2.2 Aplicaciones de nanomateriales en la agricultura

Los nanomateriales están transformando la agricultura mediante su uso en la optimización del suministro controlado de fertilizantes, mejoramiento en la absorción de nutrientes y como agentes para el tratamiento de semillas y protección contra plagas. Este hecho contribuye notablemente en prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes (Figura 1.). Como ejemplo, se ha reportado que nanopartículas de óxido de grafeno y los polímeros biodegradables permiten la liberación gradual de nutrientes, lo que aumenta su disponibilidad para las plantas y reduce las pérdidas por lixiviación (Vejan et al., 2021; Fincheira et al., 2023). Los nanofertilizantes basados en nanopartículas de sílice mesoporosa optimizan la absorción de nutrientes y nos permite reducir la cantidad de fertilizantes químicos necesarios para la nutrición (Kah et al., 2019). Otro tipo de nanopartículas que igualmente ha mostrado buenos resultados, son los sistemas a base

de hierro y zinc, que mejoran la distribución de los nutrientes en las plantas, favorecen su crecimiento y aumentan la resistencia a factores de estrés abiótico como la sequía (Gupta et al., 2020). Del mismo modo, el óxido de grafeno ha demostrado aumentar el vigor de las plántulas en cultivos como el tomate (Vera-Reyes et al., 2023), mientras que, sistemas nanoestructurados utilizados como nanosensores facilitan la detección temprana de deficiencias de nutrientes (Rani et al., 2020).

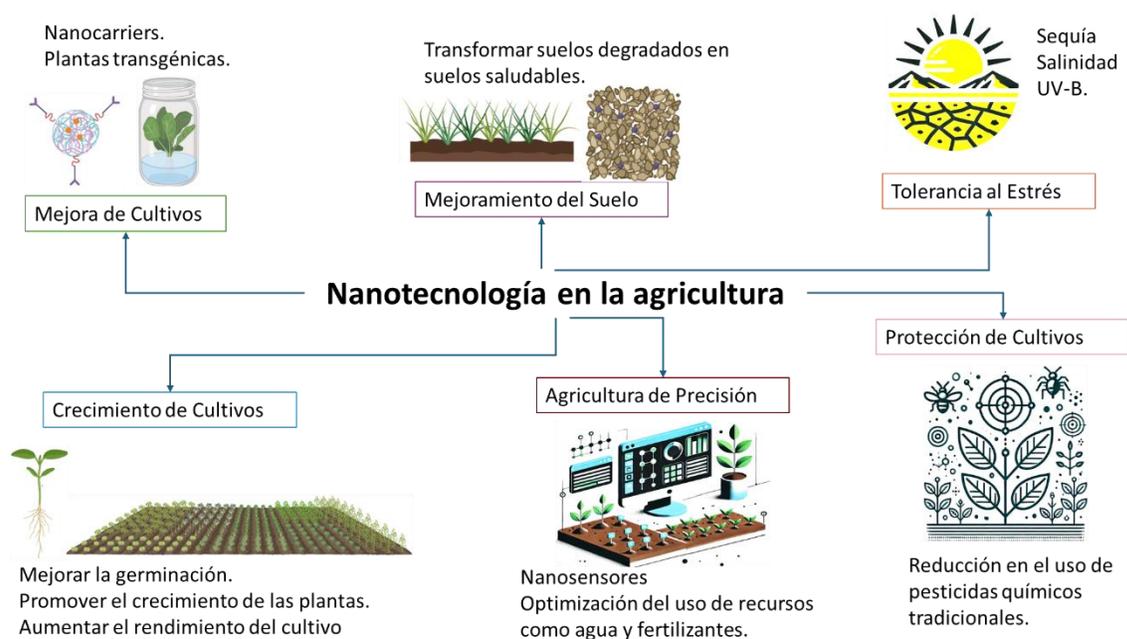


Figura 1. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura.

Por otra parte, los nanomateriales también se han utilizado en el tratamiento de semillas. Nanopartículas de plata y óxido de cobre han mostrado proteger las semillas de infecciones fúngicas y bacterianas, aumentando las tasas de germinación (Shang et al., 2019). El óxido de grafeno también ha mostrado ser un buen inductor en la mejora del crecimiento de diversas plántulas al estimular la actividad antioxidante (Chhipa, 2019; Lira-Saldivar et al., 2023). En cuanto a la protección contra plagas, los nanopesticidas basados en plata y zinc permiten una liberación controlada de compuestos, lo que reduce la cantidad de pesticidas necesarios y minimiza su impacto ambiental (Fabiya et al., 2020).

Además de los nanomateriales previamente mencionados, se han descubierto otros con aplicaciones destacadas en la agricultura. Los nanomateriales basados en hierro y óxidos de hierro han demostrado mejorar la resistencia de las plantas a diversos factores de estrés y optimizar la entrega de nutrientes (Spanos et al., 2021). Las nanopartículas de dióxido de titanio, utilizadas como promotores del crecimiento, mejoran la fotosíntesis y el uso eficiente de la luz solar (Zhao et al., 2022). Los nanomateriales derivados de plantas han mostrado ser una alternativa ecológica y efectiva para mejorar la liberación de nutrientes y controlar plagas (Ghosh et al., 2023). Por ejemplo, están las nanopartículas de hidroxiapatita que se utilizan para optimizar la liberación de fosfatos en los cultivos, mientras que los nanomateriales de carbono mejoran la retención de agua en suelos secos (Saleem & Zaidi, 2020).

2.2.3 Beneficios y desafíos de la nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología ofrece múltiples beneficios en la agricultura, posicionándose como una herramienta clave para mejorar la eficiencia en el uso de recursos, reducir la contaminación ambiental y aumentar la productividad de los cultivos. Una de las principales ventajas de esta tecnología es su capacidad para optimizar el uso de nutrientes a través de la aplicación de nano fertilizantes, que permiten una liberación controlada y dirigida de nutrientes directamente a las plantas. Esta precisión en la entrega de nutrientes no solo reduce la cantidad de fertilizantes necesarios, sino que también minimiza las pérdidas por lixiviación y volatilización, mejorando la eficiencia del uso de los recursos agrícolas disponibles (Rana et al., 2021; Miguel-Rojas & Pérez-de-Luque, 2023).

La nanotecnología contribuye significativamente a la reducción de la contaminación ambiental. El uso de nano pesticidas y nano fertilizantes más eficientes disminuye la cantidad de agroquímicos aplicados en los cultivos, reduciendo así su impacto negativo en el suelo y el agua. Estas innovaciones también ayudan a mejorar la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades, lo que permite un uso más racional y limitado de pesticidas, reduciendo así la contaminación del ecosistema circundante (Usman et al., 2020). Por otro lado, las nanopartículas pueden aumentar la capacidad de las plantas para resistir diversos tipos de estrés abiótico, como

la sequía, la salinidad y las temperaturas extremas, al activar mecanismos antioxidantes y mejorar la absorción de nutrientes, lo que resulta en un crecimiento más robusto y productivo de los cultivos (Aguirre-Becerra et al., 2022).

La aplicación de nanomateriales también ha demostrado su efectividad en la mejora de la calidad de los cultivos. Por ejemplo, la tecnología de nano-priming en semillas puede mejorar la germinación, el crecimiento de las plántulas y la resistencia a enfermedades, garantizando así alimentos más frescos y de mayor calidad para el consumo humano (Pereira et al., 2021). Al integrar estas tecnologías avanzadas en la agricultura, se promueve una mayor sostenibilidad al reducir la dependencia de productos químicos tradicionales y mejorar la eficiencia del manejo de los cultivos.

A pesar de estos beneficios, el uso de la nanotecnología en la agricultura también enfrenta desafíos significativos. Es necesario abordar cuestiones relacionadas con la seguridad de los nanomateriales y su aceptación por parte de los agricultores y consumidores. La implementación exitosa de estas tecnologías dependerá de estudios adicionales que evalúen los posibles riesgos para la salud y el medio ambiente, así como de una mayor educación y capacitación de los agricultores sobre el uso adecuado de estas innovaciones (Usman et al., 2020; Miguel-Rojas & Pérez-de-Luque, 2023). A medida que la investigación en esta área avanza, es probable que la nanotecnología continúe ofreciendo soluciones prometedoras para aumentar la productividad de los cultivos de manera más sostenible.

2.3 Propiedades y usos del óxido de grafeno (OG) y del óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG)

2.3.1 Óxido de Grafeno (OG)

Estructura y propiedades físicas y químicas del óxido de grafeno

El óxido de grafeno (OG) es una variante del grafeno que contiene grupos funcionales oxigenados en su estructura, lo que lo hace altamente hidrofílico y permite su dispersión en agua y otros solventes. Se obtiene principalmente a partir de la oxidación del grafito, lo que introduce defectos

y funcionalización con grupos como epóxidos, hidroxilos y carboxilos, alterando sus propiedades electrónicas y mecánicas. A diferencia del grafeno puro, que es un conductor excelente, el OG es aislante, pero puede ser reducido para recuperar parcialmente sus propiedades conductivas (Pei & Cheng, 2012). Un esquema representativo del grafeno y sus principales características se observan en la Fig. 2.

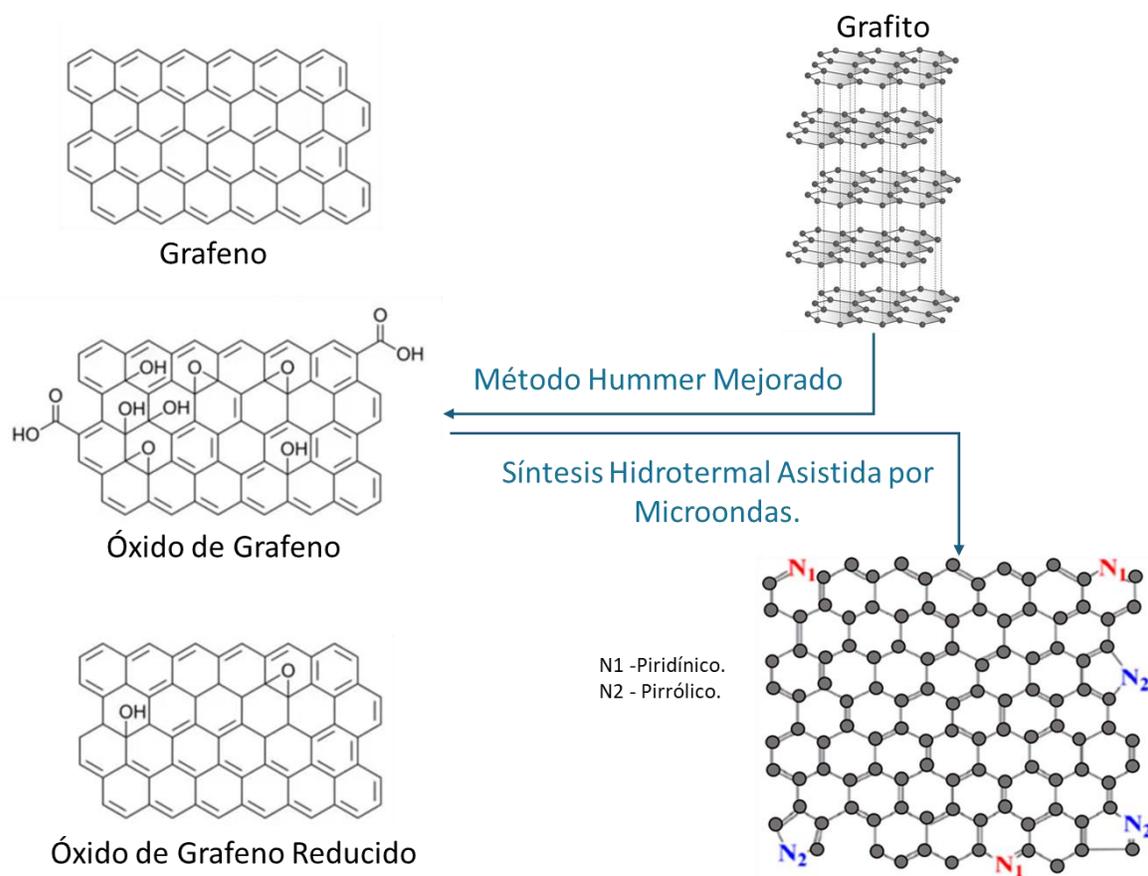


Figura 2. Estructura del grafeno, óxido de grafeno, óxido de grafeno reducido y óxido de grafeno dopado con nitrógeno.

El OG es procesable y fácil de manipular gracias a su capacidad de dispersión, lo que lo hace atractivo para la producción de nanomateriales en gran escala (Singh et al., 2016). El uso de técnicas de caracterización avanzada ha permitido un mayor entendimiento de su estructura, lo cual es crucial para futuras aplicaciones (Sajjad et al., 2017).

El OG se obtiene principalmente mediante la oxidación química del grafito, lo que introduce oxígenos funcionales en su estructura y facilita su posterior exfoliación. Uno de los métodos más tradicionales es el método de *Hummers*, que implica la oxidación del grafito utilizando una mezcla de ácido sulfúrico concentrado, permanganato de potasio y nitrato de sodio. Este proceso introduce grupos funcionales oxigenados en las capas de grafito, facilitando la exfoliación en láminas de grafeno oxidado. Sin embargo, este método tiene el inconveniente de generar gases tóxicos, lo que ha motivado el desarrollo de versiones modificadas más ecológicas para minimizar estos riesgos (Shao et al., 2012).

Otro método que ha ganado popularidad en los últimos años es la exfoliación electroquímica, que se destaca por ser más ecológico. Este proceso utiliza la oxidación anódica del grafito en una solución ácida, donde las capas de óxido de grafeno se exfolian con alta eficiencia. A diferencia de los métodos químicos tradicionales, este enfoque evita el uso de oxidantes peligrosos y produce OG como partículas sin aglomerados y menos defectos estructurales (Yu et al., 2016). La exfoliación se logra a través de la intercalación de iones, seguida de la oxidación y una exfoliación mecánica que separa las capas de grafeno (Xia et al., 2020) (Fig. 3).

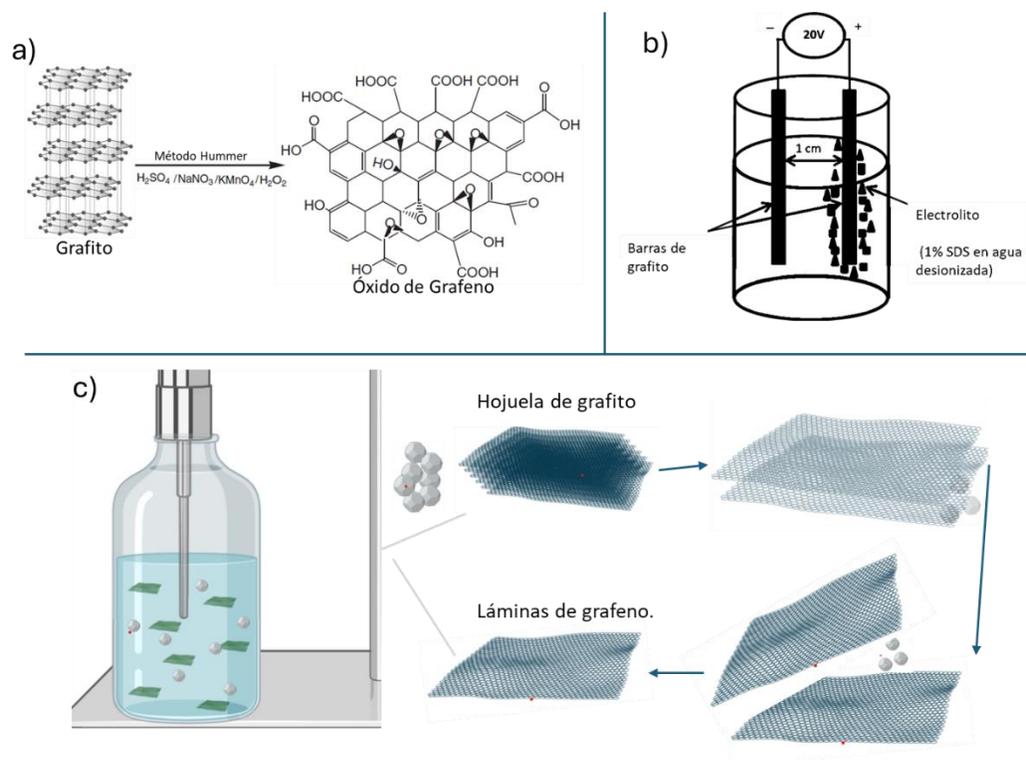


Figura 3. Métodos de producción de OG a) Método por oxidación química, b) Método de exfoliación electroquímica y c) Método de exfoliación en fase líquida

Finalmente, otro método ampliamente utilizado es la exfoliación en fase líquida, que consiste en la separación del grafito en solventes apropiados, asistida por ultrasonido. Este método permite obtener grandes cantidades de OG con diferentes grados de oxidación, los cuales se controlan ajustando el tiempo de exposición y la concentración del oxidante. Este enfoque es versátil y escalable, permitiendo producir materiales de alta calidad para diversas aplicaciones industriales y tecnológicas (Ciesielski & Samorí, 2014).

2.3.2 Aplicaciones agrícolas del OG

El óxido de grafeno (OG) ha demostrado tener un potencial significativo para diversas aplicaciones en la agricultura. Debido a su alta capacidad de adsorción y liberación controlada, OG puede actuar como un nanomaterial clave en sistemas de liberación inteligente de nutrientes y pesticidas. Estas propiedades permiten optimizar el uso de fertilizantes y pesticidas, mejorando la eficiencia y reduciendo el impacto ambiental. En particular, el óxido de grafeno puede ser

utilizado para la nanoencapsulación de nutrientes, proporcionando una liberación más efectiva y dirigida a las plantas, lo que contribuye a mejorar el rendimiento agrícola sin afectar negativamente al medio ambiente (Affraido, 2023).

Además, el OG tiene la capacidad de mejorar el crecimiento de las plantas mediante la modulación de parámetros fisiológicos. Se ha encontrado que el OG puede aumentar la absorción de agua y nutrientes por las plantas, lo que facilita un mejor desarrollo en condiciones de estrés ambiental, como la salinidad. En estudios recientes, el OG aplicado en diferentes concentraciones ha demostrado mejorar significativamente la altura de las plantas, la biomasa y el contenido de clorofila bajo condiciones de estrés salino (Safikhani et al., 2018).

Otra aplicación interesante es su uso en el control de plagas agrícolas. El OG puede actuar como un portador de pesticidas, liberando el principio activo de manera controlada y dirigida a los sitios específicos donde se encuentran las plagas. Esto mejora la efectividad del pesticida y minimiza la deriva de los químicos hacia áreas no deseadas, lo que reduce la cantidad de pesticida requerida y los efectos adversos en el medio ambiente (Sharma et al., 2017).

Además de estas aplicaciones generales, el óxido de grafeno ha demostrado ser especialmente útil en el tratamiento de semillas y la mejora de su germinación. Un estudio reciente, encontró que las nanopartículas de OG mejoraron el vigor de las semillas de tomate, aumentando la longitud de las raíces y estimulando el crecimiento en comparación con el control. Este efecto positivo se observó a concentraciones óptimas, lo que sugiere que el OG puede mejorar la germinación y el crecimiento temprano de las plantas, e incluso despertar del letargo, semillas que se han vuelto difíciles de germinar (Vera-Reyes et al., 2023).

No obstante, los efectos del OG no siempre son positivos, porque en algunos casos se ha observado que puede inhibir el crecimiento de ciertas especies vegetales a concentraciones elevadas. Por ejemplo, en estudios con lechuga, el OG disminuyó tanto la tasa de germinación como la longitud de las raíces y brotes en altas concentraciones (Lee et al., 2021).

Se ha demostrado que el OG puede promover la germinación de plantas en suelo, como en el caso de la espinaca y el cebollino, actuando como un transportador de agua que mejora la disponibilidad de este recurso para las semillas, acelerando así el proceso de germinación sin causar efectos fitotóxicos detectables en las plantas (He et al., 2018).

Además, el OG ha mostrado efectos interesantes en la interacción con metales pesados como el cadmio (Cd). En condiciones de alta concentración de Cd, el OG puede adsorber este metal y modificar su absorción por las plantas, lo que puede mitigar los efectos tóxicos del Cd en el desarrollo de las plántulas (Yin et al., 2018).

2.3.3 Dopaje del óxido de grafeno con nitrógeno (NOG)

El dopaje del OG grafeno con nitrógeno (NOG) introduce modificaciones estructurales en el grafeno que mejoran su reactividad química y afinidad con las membranas celulares. Estas modificaciones se producen cuando los átomos de nitrógeno sustituyen a los átomos de carbono en la estructura del grafeno, lo que altera las propiedades electrónicas locales, incrementa la densidad de portadores de carga y mejora la conductividad del material. En estudios se ha observado que los átomos de nitrógeno se integran en configuraciones piridínicas y pirrónicas dentro de la estructura del grafeno, lo que aumenta su actividad catalítica, su capacidad de adsorber moléculas biológicas y mejorar las interacciones con membranas celulares (Pham et al., 2014).

El dopaje con nitrógeno también ha demostrado mejorar la interacción de las hojas de grafeno con moléculas biológicas como el insecticida imidacloprid, mejorando la eficiencia en su detección electroquímica debido a las interacciones con los sitios de nitrógeno (Si et al., 2016).

Asimismo, el OG dopado con nitrógeno ha mostrado un rendimiento superior en la detección de óxido nítrico (NO) en células vivas, un mensajero biológico clave en múltiples procesos biológicos. Un biosensor basado en OG dopado con nitrógeno funcionalizado con ftalocianina de hierro ha

demostrado una alta sensibilidad para detectar la liberación de NO en tiempo real, lo que subraya su utilidad en aplicaciones biomédicas (Xu et al., 2018).

El OG dopado con nitrógeno ha sido aplicado en sensores electroquímicos para detectar simultáneamente biomoléculas como el ácido ascórbico, dopamina y ácido úrico. Los aerogeles de OG dopados facilitan estas interacciones y mejoran la sensibilidad en aplicaciones médicas (Feng et al., 2020).

En cuanto a la citotoxicidad, el OG dopado con nitrógeno ha mostrado efectos selectivos en células humanas, incluyendo apoptosis, generación de radicales libres y daño al ADN en células cancerígenas. Los efectos varían dependiendo del contenido de nitrógeno y del tipo de célula, destacando su alta capacidad para interactuar de manera selectiva en diferentes contextos celulares (Bâldea et al., 2020).

Estos ejemplos evidencian que el dopaje con nitrógeno en el óxido de grafeno no solo altera sus propiedades electrónicas, sino que también potencia su reactividad química y afinidad con moléculas biológicas y membranas celulares, lo que lo convierte en un material prometedor para aplicaciones biológicas y sensores moleculares.

2.3.4 Comparación entre OG y NOG en aplicaciones agrícolas

El óxido de grafeno (OG) y el óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG) han despertado un gran interés en aplicaciones agrícolas debido a sus propiedades únicas, aunque presentan diferencias clave en reactividad química y eficiencia. El OG se ha utilizado ampliamente en la agricultura por su capacidad para adsorber y liberar sustancias como fertilizantes y pesticidas de manera controlada, lo que facilita la absorción de nutrientes en las plantas. Sin embargo, su capacidad catalítica es limitada, lo que reduce su efectividad en la degradación de contaminantes y en el control de plagas (Affrald, 2023).

Por otro lado, el dopaje con nitrógeno en el óxido de grafeno mejora significativamente sus propiedades catalíticas y de adsorción. El NOG destaca por su capacidad para catalizar reacciones importantes, como la degradación de pesticidas y contaminantes en suelos agrícolas. La estructura del NOG, que incluye configuraciones piridínicas y pirrónicas, le otorga una mayor reactividad en comparación con el OG, lo que lo hace más eficiente en aplicaciones que requieren procesos catalíticos avanzados, como la remediación de suelos contaminados y el control de plagas (Sun et al., 2013).

El dopaje con nitrógeno crea defectos en la estructura del OG que forman poros, incrementando su área superficial y facilitando la interacción con biomoléculas como vitaminas, aminoácidos y glucosa a través de interacciones π - π , hidrofóbicas, enlaces de hidrógeno y electrostáticos. Estas características lo convierten en un nanoadsorbente prometedor para aplicaciones en tratamiento de agua, donde ha demostrado una alta selectividad y sensibilidad en la detección de biomoléculas, como se ha visto en el campo de los biosensores (Yokwana et al., 2023). Esta información podría indicar que el NOG tiene el potencial de ser útil en la liberación controlada de nutrientes gracias a su capacidad de adsorción mejorada. No obstante, su principal ventaja radica en su capacidad para adsorber contaminantes orgánicos y metales pesados, lo que podría resultar útil en la purificación de agua o la descontaminación de suelos agrícolas.

El NOG ha demostrado ser más eficiente que el OG en la degradación de insecticidas, porque es capaz de generar especies reactivas de oxígeno (ROS) sin necesidad de metales, lo que lo convierte en una opción más ecológica para la descontaminación de suelos y la eliminación de insecticidas. Esta capacidad lo posiciona como una herramienta prometedora para la agricultura sostenible, permitiendo mantener la productividad sin comprometer el medio ambiente (Duan et al., 2015). Además, su capacidad catalítica mejorada facilita la adsorción de contaminantes y los nanocompositos basados en NOG han demostrado ser altamente efectivos en la remediación de suelos contaminados por metales pesados y productos químicos agrícolas (Chen et al., 2012).

Otra ventaja clave del NOG es su biocompatibilidad superior en comparación con el OG. Esto se traduce en menores niveles de toxicidad y una mayor integración con estructuras biológicas, lo

que lo hace más adecuado para aplicaciones agrícolas que implican el contacto con organismos vivos, como plantas y microorganismos (Duan et al., 2016).

2.4 Impacto de las nanopartículas de grafeno en las plantas

Kim et al. (2020) observaron que el OG combinado con nanopartículas de plata (Ag-OG) promovió la elongación de raíces a bajas concentraciones (0.2 mg mL^{-1}), mientras que, en alfalfa, concentraciones más altas (1.6 mg mL^{-1}) inhibieron el crecimiento radicular, demostrando un efecto dependiente de la concentración (Kim et al., 2020). Chen et al. (2018) encontraron que el OG modificado con amina (G-NH₂) estimuló el crecimiento de raíces y tallos en trigo, lo que sugiere que ciertas modificaciones del OG pueden tener un efecto positivo en las primeras etapas del crecimiento vegetal (Chen et al., 2018).

En cuanto al crecimiento de raíces y hojas, Lee et al. (2021) reportaron que altas concentraciones de OG redujeron la longitud de raíces y brotes en lechuga y alfalfa, mientras que Zhang et al. (2021) demostraron que concentraciones óptimas de OG mejoraron significativamente el crecimiento de Aloe vera, estimulando además la capacidad fotosintética sin generar estrés oxidativo (Lee et al., 2021; Zhang et al., 2021).

El OG también influye en la regulación hormonal de las plantas. Cheng et al. (2016) demostraron que el OG afecta las concentraciones de ácido abscísico (ABA) y ácido indolacético (IAA) en *Brassica napus*, inhibiendo el crecimiento radicular. De manera similar, Du et al. (2016) observaron que el óxido de grafeno reducido (ROG) inhibió el crecimiento de la microalga *Scenedesmus obliquus* debido a un aumento del estrés oxidativo (Cheng et al., 2016; Du et al., 2016).

En relación con los efectos en la fotosíntesis, Siddiqui et al. (2019) observaron que el OG aumentó los niveles de clorofila y carotenoides en plantas de zanahoria, mejorando la fotosíntesis y promoviendo el crecimiento de las plantas, además de aumentar su resistencia a enfermedades. En arroz, Lu et al. (2020) reportaron que el OG acumulado en las hojas aumentó la producción de

ATP y facilitó el transporte de electrones en el fotosistema II, mejorando la eficiencia fotosintética (Siddiqui et al., 2019; Lu et al., 2020).

El óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG) ha mostrado efectos beneficiosos en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Wang et al. (2023) estudiaron el impacto del NOG en plántulas de maíz y encontraron que, a concentraciones óptimas de 50 g kg⁻¹, mejoró significativamente la altura, diámetro del tallo, área foliar y peso seco de las plantas. Además, aumentó la tasa fotosintética neta, la conductancia estomática y la transpiración. Estos resultados sugieren que el dopaje con nitrógeno en el grafeno regula las enzimas clave del metabolismo de carbono y nitrógeno, promoviendo el equilibrio metabólico y mejorando el crecimiento vegetal (Wang et al., 2023).

Chen et al. (2020) demostraron que los puntos de carbono funcionales dopados con nitrógeno (N-FCNs) mejoraron la tasa de germinación de semillas de tomate y maíz, así como la elongación de raíces, acumulación de biomasa y el contenido de clorofila en las hojas jóvenes. Asimismo, Li et al. (2021) encontraron que los puntos de carbono dopados con nitrógeno y magnesio promovieron el crecimiento de plántulas de arroz, aumentando los niveles de clorofila y la eficiencia fotosintética (Chen et al., 2020; Li et al., 2021).

En cuanto a las interacciones a nivel celular, Hu et al. (2014) descubrieron que el OG interactúa con las células vegetales al adherirse a las superficies celulares y causar daños a los orgánulos como los cloroplastos. Además, inhibió la división celular y aumentó la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que generó estrés oxidativo y alteró el metabolismo de aminoácidos y carbohidratos en las células. Aunque no menciona el dopaje con nitrógeno, este estudio muestra cómo el OG afecta la estructura celular y los procesos metabólicos en las plantas, lo que podría influir en su crecimiento a largo plazo (Hu et al., 2014).

En un estudio realizado por Mehrabani et al. (2023), se investigaron los efectos de la aplicación foliar de OG y nano-hierro en plantas de albahaca sometidas a estrés salino. Los resultados mostraron que el OG aumentó significativamente el contenido de potasio y calcio en las plantas,

mejorando su resistencia al estrés salino y estimulando la actividad antioxidante, como la catalasa y el contenido de clorofila. Esto sugiere que el OG no solo favorece la absorción de nutrientes, sino que también ayuda a mitigar los efectos del estrés oxidativo (Mehrabani et al., 2023).

Duan et al. (2015) también estudiaron el óxido de grafeno dopado con azufre y nitrógeno y su capacidad para mejorar las reacciones catalíticas de oxidación mediante la activación de peroximonosulfato (PMS). Aunque este estudio no se centró en plantas, mostró que el dopaje con nitrógeno y azufre mejora significativamente la reactividad y transferencia electrónica del grafeno, lo que puede tener implicaciones importantes en la remediación de suelos agrícolas y la mejora en la absorción de nutrientes como potasio y calcio en futuras aplicaciones agrícolas (Duan et al., 2015).

En conjunto, los estudios muestran que tanto el OG como el NOG tienen el potencial de mejorar diversos procesos fisiológicos en las plantas, como la fotosíntesis, la transpiración y el crecimiento, dependiendo de las condiciones de uso y las especies vegetales. Las propiedades de adsorción y modulación metabólica del grafeno dopado con nitrógeno parecen tener aplicaciones especialmente prometedoras en la agricultura.

2.5 El rábano (*Raphanus sativus*)

2.5.1 cultivo y propiedades nutricionales

El rábano (*Raphanus sativus*) es una planta herbácea perteneciente a la familia Brassicaceae, conocida por su versatilidad en el cultivo y su valor tanto alimenticio como medicinal. Se trata de una especie que se puede cultivar durante todo el año, pero las condiciones óptimas varían según la estación y el clima de la región. Presenta una raíz comestible de diferentes colores, como blanco, rojo, púrpura y negro, haciéndolo atractivo para la agricultura en diversas partes del mundo (Nakamura et al., 2008; Akram et al., 2015). El rábano es particularmente apreciado por su rápido crecimiento, lo que permite cosechas tempranas y es resistente a climas fríos, convirtiéndolo en un cultivo ideal en climas templados (Ngouajio y Mutch, 2004).

Este vegetal es ampliamente valorado por su composición nutricional. Contiene altos niveles de vitamina C, vitamina A, calcio, magnesio y potasio, lo que le confiere un valor nutricional elevado (Khan et al., 2022). Además, contiene compuestos bioactivos como glucosinolatos, flavonoides y antocianinas que no solo son responsables de sus colores distintivos, sino que también poseen propiedades antioxidantes y anticarcinogénicas (Beevi et al., 2009; Jahangir et al., 2009). Las hojas de rábano, a menudo subutilizadas, son especialmente ricas en estos compuestos y pueden tener un mayor contenido de nutrientes y antioxidantes en comparación con la raíz (Khan et al., 2022).

En términos de cultivo, el rábano es una planta de fácil manejo que prefiere suelos bien drenados y ricos en materia orgánica. La planta requiere exposición solar plena y riegos frecuentes para asegurar el desarrollo adecuado de la raíz, que es la parte consumida principalmente (Ngouajio y Mutch, 2004). Por su corta duración de ciclo, puede cultivarse varias veces al año, lo que la convierte en un cultivo eficiente y rentable para los agricultores (Khan et al., 2022).

Históricamente, el rábano ha sido utilizado en la medicina tradicional por sus múltiples propiedades terapéuticas, destacando su uso como diurético, digestivo y protector hepático (Castro-Torres et al., 2013). Además, se ha demostrado su eficacia en la reducción de niveles de colesterol, lo que lo convierte en un aliado en la prevención de enfermedades cardiovasculares (Hanlon et al., 2007). La capacidad antioxidante del rábano, atribuida en gran medida a sus glucosinolatos y flavonoides, ha sido investigada por su potencial en la prevención del daño oxidativo en células humanas, incluyendo la protección contra el cáncer (Fahey et al., 2012).

2.5.2 El rábano como planta modelo en estudios de nanotecnología

El rábano (*Raphanus sativus*) ha emergido como una planta modelo significativa en estudios de nanotecnología agrícola debido a su rápido ciclo de vida, facilidad de cultivo y sensibilidad a condiciones ambientales y tratamientos experimentales. Al pertenecer a la familia Brassicaceae, que incluye otros cultivos importantes como el brócoli y la col, el rábano ha sido utilizado para evaluar el impacto de diversas nanopartículas y compuestos relacionados con la nanotecnología,

con el objetivo de mejorar la producción agrícola y explorar su toxicidad potencial en sistemas biológicos (Khan et al., 2022; Castro-Torres et al., 2014)

Una de las principales razones por las que el rábano es un modelo adecuado para estos estudios es su respuesta fisiológica rápida y visible, lo que facilita la evaluación del impacto de las nanopartículas en su crecimiento y desarrollo. Por ejemplo, en estudios recientes, se ha empleado el rábano para analizar los efectos de nanotubos de carbono y otras nanopartículas sobre parámetros clave como la germinación, el crecimiento de las raíces, y la absorción de agua y nutrientes. Los estudios han mostrado que las nanopartículas pueden tanto mejorar como inhibir el crecimiento de las plantas, dependiendo de su concentración y características fisicoquímicas (Khan et al., 2022; Castro-Torres et al., 2014).

Además, el rábano es particularmente útil en estudios de interacción planta-nanopartícula, porque permite observar cómo los sistemas radiculares absorben y translocan las nanopartículas a otras partes de la planta. En este contexto, las raíces del rábano actúan como bioindicadores que muestran la capacidad de la planta para absorber y acumular nanomateriales, proporcionando información clave para la fitorremediación o para el diseño de fertilizantes nanoestructurados más eficientes (Kang et al., 2020).

Además de su capacidad para absorber y translocar nanopartículas, el rábano también ha sido un modelo valioso para examinar el impacto de estos materiales sobre la expresión genética. Estudios sobre la aplicación de nanopartículas en plantas de rábano han demostrado cambios en la expresión de genes relacionados con el estrés, el metabolismo de antioxidantes y la defensa contra patógenos, lo que abre nuevas oportunidades para mejorar la resistencia a enfermedades y condiciones ambientales adversas mediante enfoques nanotecnológicos (Goyeneche et al., 2018; Noman et al., 2021).

La nanotecnología agrícola se ha beneficiado enormemente de estos estudios en rábano, que han permitido mejorar la comprensión de cómo las nanopartículas interactúan con sistemas

biológicos, así como el potencial para diseñar tecnologías más eficientes y seguras para su uso en agricultura (Castro-Torres et al., 2014).

2.5.3 Nanopartículas de carbono en el crecimiento y desarrollo del rábano

El uso de nanopartículas de carbono, como los nanotubos de carbono de paredes múltiples (NTCM) y el óxido de grafeno (OG), ha despertado gran interés en la nanotecnología agrícola por sus potenciales aplicaciones en el mejoramiento del crecimiento de las plantas y la resistencia a patógenos. El rábano (*Raphanus sativus*), debido a su rápido ciclo de vida y sensibilidad a factores ambientales, ha sido utilizado como modelo para estudiar el impacto de estos nanomateriales. Sin embargo, los resultados han mostrado tanto beneficios como riesgos asociados con su uso, dependiendo de la concentración y el método de aplicación.

El rábano ha sido tratado con nanopartículas de carbono mediante aplicaciones foliares y en la etapa de germinación. Uno de los trabajos más importantes es el de Lira-Saldivar et al. (2023), donde se evaluó la fitotoxicidad del NTCM y el OG. En este estudio, las nanopartículas fueron aplicadas en concentraciones de 100 y 200 ppm, tanto en la etapa de germinación como a través de aplicaciones foliares semanales. Los resultados revelaron que, a concentraciones más altas, tanto los NTCM como el OG causaron efectos adversos significativos, reduciendo la altura de la planta, el área foliar, el tamaño del bulbo y la biomasa total. De hecho, se observó una disminución del 51.73% en la biomasa seca del bulbo y una reducción del 28.58% en la biomasa de la parte aérea en las plantas tratadas con nanopartículas de OG a 200 ppm (Lira-Saldivar et al., 2023).

Además, se observó que el OG afecta principalmente las raíces y el bulbo, las cuales son zonas críticas para la absorción de agua y nutrientes. Aunque el índice de clorofila y el número de hojas no mostraron cambios significativos, la reducción en la biomasa y el área foliar sugiere que los efectos fitotóxicos de las nanopartículas se manifiestan principalmente en las partes subterráneas de la planta, lo que podría afectar el rendimiento del cultivo en general (Lira-Saldivar et al., 2023).

Por otro lado, estudios como el de Mondal et al. (2011) han mostrado que las nanopartículas de carbono, en concentraciones más bajas, pueden tener efectos beneficiosos sobre el crecimiento de las plantas. En este estudio, se observó que la aplicación de NTCM en bajas concentraciones mejoró la biomasa y promovió un mayor desarrollo radicular y aéreo en las plantas de rábano. Esto sugiere que, en dosis controladas, las nanopartículas pueden actuar como estimulantes del crecimiento vegetal al mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la eficiencia en la fotosíntesis (Mondal et al., 2011).

No obstante, es fundamental señalar que, el uso de nanopartículas en la agricultura debe ser manejado con cuidado. Mientras que en concentraciones bajas los nanomateriales pueden ofrecer beneficios potenciales, como el incremento de la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, dosis más altas pueden ser perjudiciales y provocar estrés oxidativo en las plantas. Esto ocurre debido a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que dañan las membranas celulares y disminuyen la biomasa (Lira-Saldivar et al., 2023). Estos hallazgos subrayan la importancia de realizar una evaluación exhaustiva antes de implementar estas tecnologías en cultivos comerciales.

3. JUSTIFICACIÓN

Comprender los impactos del óxido de grafeno y el óxido de grafeno dopado con nitrógeno, requiere estudios adicionales para garantizar una aplicación segura y efectiva en la producción agrícola, por eso es importante evaluar sus efectos durante la germinación y mediante aplicaciones foliares a diversas concentraciones para conocer su influencia en el crecimiento y la calidad de los cultivos. El rábano se posiciona como un modelo idóneo para la exploración de la nanotecnología en la agricultura debido su rápida tasa de crecimiento. Además, es importante destacar que el rábano no solo desempeña un papel significativo en la investigación científica, sino que también posee una importancia arraigada en la cultura y gastronomía mexicana.

De acuerdo con los antecedentes y literatura revisada, se proponen las siguientes preguntas científicas.

¿Qué efecto tendrá el óxido de grafeno y el óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el cultivo de rábano? ¿Cuál será la dosis adecuada del óxido de grafeno y el óxido de grafeno dopado con nitrógeno para potenciar los efectos benéficos en el rábano?

4. HIPÓTESIS

Algunos estudios mostraron que, el óxido de grafeno favoreció el crecimiento de raíces y tallos, incrementaron clorofila, nutrientes, y la actividad antioxidante, mitigaron el estrés salino, redujeron enfermedades y estimularon la producción de metabolitos beneficiosos en algunos cultivos de interés agrícola. Por lo anterior, se espera que, la aplicación de nanopartículas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno afectará positivamente la germinación y el desarrollo de las plantas de rábano.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de las nanopartículas de óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el proceso de germinación y el crecimiento de plantas de rábano mediante aplicación foliar.

5.2 Objetivos particulares

- Estandarizar un protocolo para dopar con nitrógeno el óxido de grafeno.
- Caracterizar fisicoquímicamente los sistemas a base de óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno.
- Evaluar el efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en parámetros morfométricos y bioquímicos durante la germinación de semillas de rábano.
- Evaluar la influencia de nanopartículas óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno aplicados de manera foliar parámetros morfométricos y bioquímicos durante el crecimiento de plantas de rábano.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Obtención y preparación de nanopartículas

6.1.1 Óxido de grafeno (OG)

El óxido de grafeno utilizado se sintetizó mediante el método de Hummers y fue proporcionado por el Dr. Issac Mata Cruz del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Las muestras contenían una pureza superior al 98.5%. Este material sirvió como base para la síntesis del óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG).

6.1.2 Síntesis de óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG)

La síntesis de NOG se realizó mediante el dopaje con nitrógeno utilizando una solución de amoníaco acuoso en un proceso de ultrasonificación a baja temperatura, como lo describen Tao et al. (2017). Los pasos detallados son los siguientes:

Preparación de la solución de amoníaco. Se utilizó una solución acuosa de amoníaco (NH_4OH , 25%) comercial, sin purificación adicional. Se preparó una mezcla de 30 mg de óxido de grafeno en 10 mL de esta solución de amoníaco (Tao et al., 2017).

Proceso de dopaje. La mezcla de óxido de grafeno y amoníaco se sometió a ultrasonificación durante 5 horas, utilizando un baño ultrasónico con un enfriador de laboratorio circulador o *chiller* para mantener la temperatura constante a 4°C. Este sistema de enfriamiento, conocido como *chiller*, mantuvo la temperatura a lo largo de todo el proceso para evitar que el material se sobrecalentara y o generara impurezas. El ultrasonido, con una frecuencia de 40 khz, facilitó la dispersión uniforme de las nanopartículas y promovió la incorporación de nitrógeno en la estructura del grafeno (Tao et al., 2017).

Lavado y secado. Al finalizar las 5 horas de reacción, el material dopado fue separado mediante centrifugación a 8500 rpm durante 15 min. Luego, las muestras se lavaron tres veces con una mezcla de agua destilada y acetona (3:1) para eliminar residuos de la reacción y amoníaco no

reactivo. Finalmente, las nanopartículas fueron secadas en un horno a 45°C durante la noche para asegurar la eliminación completa del solvente (Tao et al., 2017) como se muestra en la Fig. 4.

Se prepararon soluciones de OG y NOG en concentraciones de 0.5, 1, 2 y 2.5 mg L⁻¹ utilizando agua destilada estéril, las cuales se agitaron constantemente para asegurar una correcta dispersión de las nanopartículas. Estas soluciones se almacenaron en frascos a temperatura ambiente (Tao et al., 2017).

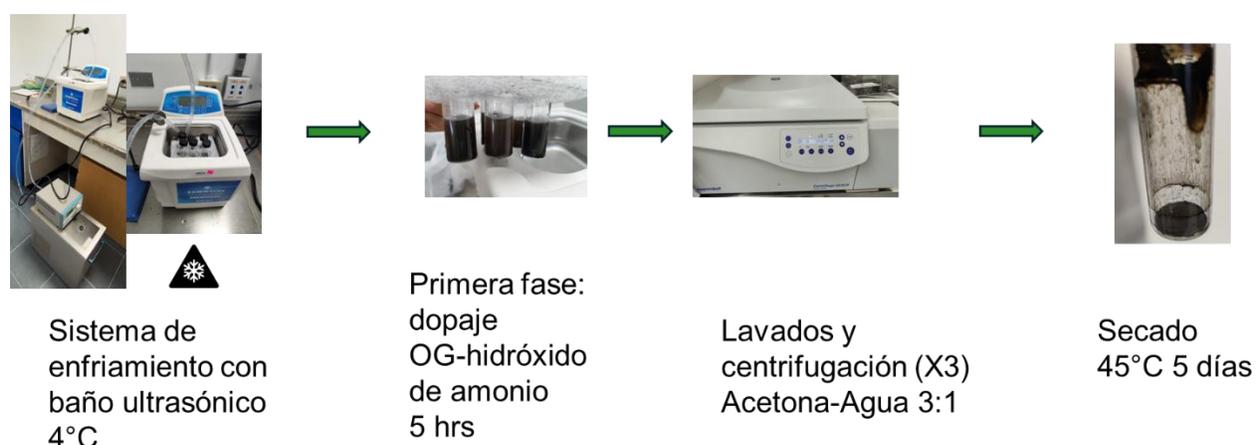


Figura 4. Síntesis de óxido de grafeno dopado con nitrógeno.

6.2 Caracterización de las nanopartículas

Las nanopartículas obtenidas, tanto el OG como el NOG, fueron caracterizadas para verificar su morfología, tamaño, composición y dopaje. Los análisis se realizaron utilizando diversas técnicas:

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Se utilizó para observar la morfología y el tamaño de las nanopartículas. El SEM permitió identificar la estructura laminar característica del óxido de grafeno y del óxido de grafeno dopado con nitrógeno, así como su estado de aglomeración.

6.2.1 Medición de láminas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno

Las mediciones de las láminas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno se realizaron utilizando el software ImageJ®. Primero, se capturaron imágenes mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y se guardaron en formato TIFF. Se calibró el software introduciendo la escala de referencia en nanómetros por píxel proporcionada por el microscopio. Con la herramienta de "Línea recta" de ImageJ®, se trazaron líneas a lo largo del ancho de cada lámina visible en las imágenes. A continuación, se utilizó la opción de "Medir" para registrar el ancho de cada lámina en nanómetros.

Espectroscopía de Fotoelectrones de Rayos X (XPS). Esta técnica se utilizó para determinar la composición química y la incorporación de átomos de nitrógeno en la estructura de las nanopartículas dopadas.

Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). Se utilizó FTIR para analizar las interacciones químicas y los grupos funcionales presentes en la superficie de las nanopartículas de OG y NOG.

Espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-Vis). Se utilizó para estudiar las propiedades ópticas de las nanopartículas en suspensión.

6.3 Material vegetal y tratamientos

Semillas. Se utilizaron semillas de *Raphanus sativus* variedad Champion, seleccionadas por su alta tasa de germinación (85%) y propiedades que las hacen adecuadas para estudios de fitotoxicidad. Las semillas se adquirieron de un proveedor certificado y se seleccionaron manualmente para asegurar uniformidad en tamaño y estado físico.

Tratamientos. Se distribuyeron en grupos experimentales, de la siguiente manera:

Grupo control (agua destilada estéril).

Tratamiento con OG en concentraciones de 0.5 mg L⁻¹, 1 mg L⁻¹, 2 mg L⁻¹ y 2.5 mg L⁻¹.

Tratamiento con NOG en concentraciones de 0.5 mg L⁻¹, 1 mg L⁻¹, 2 mg L⁻¹ y 2.5 mg L⁻¹

6.4 Prueba de germinación

La prueba de germinación se realizó antes de proceder con el experimento de crecimiento en invernadero para evaluar el efecto de las nanopartículas sobre la germinación de *Raphanus sativus*.

Condiciones de germinación. Las pruebas de germinación se llevaron a cabo en un ambiente controlado, a 25°C, en una incubadora refrigerada. Las semillas se desinfectaron previamente mediante inmersión en alcohol al 70%, seguido de un lavado con hipoclorito de sodio al 1%. Finalmente, se enjuagaron tres veces con agua destilada estéril.

Diseño experimental. Diseño completamente al azar, con cinco repeticiones por cada tratamiento; cada placa de Petri contenía 10 semillas (Fig. 5). Las semillas se colocaron en placas de Petri de 90 mm, con papel filtro humedecido con las soluciones de OG y NOG en concentraciones de 0.5 mg L⁻¹, 1 mg L⁻¹, 2 mg L⁻¹ y 2.5 mg L⁻¹, así como un control con agua destilada estéril. Evaluación de la germinación. Se registró la tasa de germinación diariamente durante 4 días. Los resultados se expresaron en términos de porcentaje de germinación para cada tratamiento y se tomaron datos del germinado utilizando el software de análisis de imágenes winrhizo®.

Para analizar la velocidad de germinación, se calcularon tres índices:

1. Índice de Velocidad de Germinación (IVG): calculado como $IVG = \sum (n_i / t_i)$, donde n_i es el número de semillas germinadas en el día i y t_i es el día correspondiente.
2. Índice de Velocidad de Germinación Sincronizada (GSI): siguiendo una metodología similar al IVG.
3. Tasa Media de Germinación (MGR): obtenida dividiendo el total de semillas germinadas entre el tiempo total de observación (4 días).

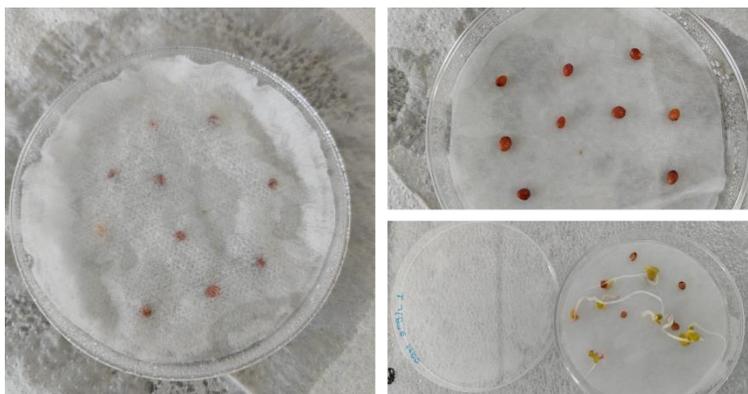


Figura 5. Montaje de la prueba de germinación.

6.5 Cultivo de plantas en invernadero

El crecimiento de las plantas en invernadero se basó en la metodología descrita por Lira-Saldivar et al. (2023), con las siguientes modificaciones.

Semillas y siembra. Se utilizaron semillas de *Raphanus sativus* variedad *Champion*, Las cuales se sembraron directamente en macetas de 8 pulgadas, con una mezcla de sustrato de 70% *peat moss* y 30% vermiculita. Se uniformizó cada maceta dejando 3 plántulas por maceta, eliminando el exceso de plántulas para garantizar una densidad uniforme en todas las unidades experimentales (Lira-Saldivar et al., 2023).

Unidades experimentales. El experimento contó con tres unidades experimentales por tratamiento y cada una de ellas tuvo 10 repeticiones.

Condiciones de cultivo. El experimento se llevó a cabo en un invernadero con temperatura promedio de 33.6 °C y humedad relativa promedio de 72.3%, ubicado en el Campo Agrícola del CIBNOR (Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.). Las plantas se regaron manualmente según la demanda de humedad del sustrato y fertilizadas con una solución de *Hoagland* cada tercer día.

Distribución experimental. El diseño experimental fue completamente aleatorizado, y las macetas se distribuyeron de manera aleatoria dentro del invernadero para evitar sesgos por efectos de microclima (Lira-Saldivar et al., 2023).

Aplicación foliar de OG y NOG. Las soluciones de OG y NOG se aplicaron foliarmente cada semana. Cada planta recibió 5 mL de la solución correspondiente, cubriendo uniformemente las hojas y tallos mediante un atomizador manual (Fig. 6).



Figura 6. Montaje del cultivo de rábano en invernadero.

6.6 Evaluación de variables fisiológicas y morfométricas

Se evaluaron al final del experimento las siguientes variables:

6.6.1 Peso fresco y seco de hojas y bulbo

Hojas. El peso fresco de las hojas se midió inmediatamente después de la cosecha. Luego, las hojas se secaron en un horno a 70°C durante 48 horas para determinar el peso seco.

Bulbo. Se midió de forma similar el peso fresco y seco del bulbo, siguiendo el mismo proceso de secado.

Tamaño del bulbo

Diámetro del bulbo. El diámetro del bulbo se midió en su punto más ancho con un vernier y cinta métrica.

Longitud del bulbo. La longitud se midió desde la base del bulbo hasta su extremo superior.

6.6.2 Área foliar, número de hojas y altura de la planta

Área foliar. Se midió utilizando el equipo LI-3100C – medidor de área foliar, que calculó el área foliar total de las hojas de cada planta.

Número de hojas. El número de hojas por planta se midió con el mismo equipo LI-3100C, que incluye un sistema para contar automáticamente las hojas mientras mide el área total.

Altura de la planta. Se midió desde la base del tallo hasta la punta de la hoja más alta utilizando un flexómetro.

6.6.3 Tasa de fotosíntesis y transpiración

Las mediciones de fotosíntesis y transpiración se realizaron con el equipo portátil CI-340. Se midieron la tasa de asimilación de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y de transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en tres hojas por planta bajo condiciones de luz controlada. Estas mediciones se realizaron durante las horas de mayor luz (10:00-14:00 horas) para asegurar máxima actividad fotosintética.

6.6.4 Índice de clorofila

El índice de clorofila se midió con un SPAD-502 en tres hojas por planta. Este equipo determina el contenido relativo de clorofila midiendo la transmisión de luz en dos longitudes de onda (650 nm y 940 nm). Las mediciones se realizaron en la cuarta semana del experimento para evaluar los cambios en la capacidad fotosintética de las plantas.

6.7 Análisis bioquímico

Se realizaron análisis bioquímicos para cuantificar carbohidratos totales, proteínas y lípidos en hojas y bulbos de las plantas.

6.7.1 Carbohidratos totales

Los carbohidratos totales se cuantificaron mediante el método de antrona, utilizando un espectrofotómetro a 620 nm. Se homogeneizaron 100 mg de tejido vegetal en TCA y el reactivo de antrona se usó para formar un complejo coloreado. Los resultados se expresaron en mg por gramo de peso seco.

6.7.2 Proteínas totales

Se cuantificadas mediante el método de BCA (ácido bicinconínico). Se extrajeron las proteínas del tejido vegetal con tampón fosfato y el complejo BCA permitió medir la absorbancia a 562 nm. Los resultados se expresaron en mg de proteína por gramo de peso seco.

6.7.3 Lípidos totales

Se determinaron con el método de sulfafosfovainillina, midiendo la absorbancia a 540 nm tras la extracción con cloroformo/metanol. Los resultados se expresaron en mg de lípidos por gramo de peso seco.

6.8 Espectrofotometría de absorción atómica

El contenido de calcio (Ca) y potasio (K) en las plantas se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica (modelo GBC Avanta, de la marca australiana GBC Scientific Equipment) tras la digestión ácida de tejido vegetal seco. Los resultados se expresaron en mg kg⁻¹ de peso seco.

6.9 Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante ANOVA y se aplicó la prueba post hoc LSD de Fisher para determinar diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos, utilizando los programas *rstudio*[®] y *sigmastat*[®]. En caso de no cumplir con la normalidad, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

7. RESULTADOS

7.1 Caracterización de óxido de grafeno y sus modificaciones

7.1.1 Caracterización UV-Vis de óxido de grafeno y sus modificaciones

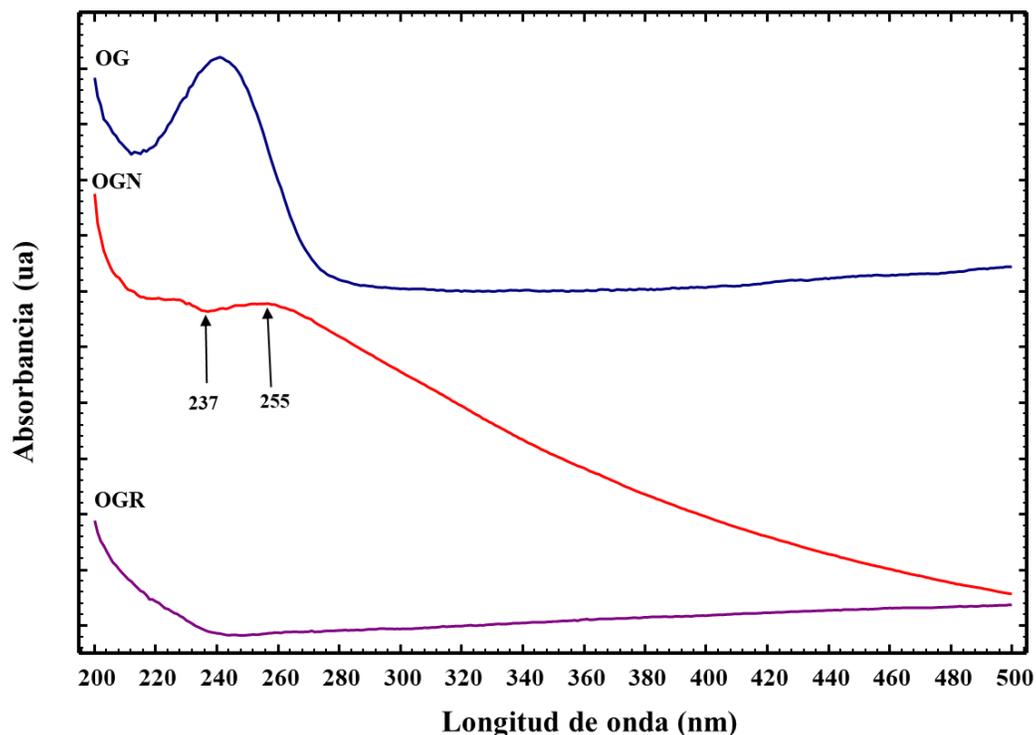


Figura 7. Análisis Comparativo de los espectros UV-Vis de óxido de grafeno, óxido de grafeno dopado con nitrógeno y óxido de grafeno reducido.

La gráfica de espectroscopía de absorción UV-Vis (Fig. 7.) muestra los espectros de absorción de óxido de grafeno (OG), óxido de grafeno dopado con nitrógeno (OGN) y óxido de grafeno reducido (OGR). El OG presenta un pico característico alrededor de 230 nm, asociado con las transiciones π - π^* de los enlaces C=C, típico de su estado oxidado y una cola que indica la presencia de defectos estructurales (Khai et al., 2012). En el caso de OGN, se observan dos picos a 237 nm y 255 nm, lo que indica que el dopaje con nitrógeno ha modificado la estructura electrónica, desplazando el pico hacia mayores longitudes de onda debido a las transiciones π - π^* en los enlaces C=N o C-N (Pei et al., 2013). En cuanto a OGR, su espectro es mucho más plano, sin picos bien definidos, lo que manifiesta una reducción exitosa del material, disminuyendo la absorción y restaurando

parcialmente la estructura grafénica. Estas diferencias indican cómo el dopaje y la reducción afectan las propiedades del grafeno (Sandoval et al., 2016).

7.1.2 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

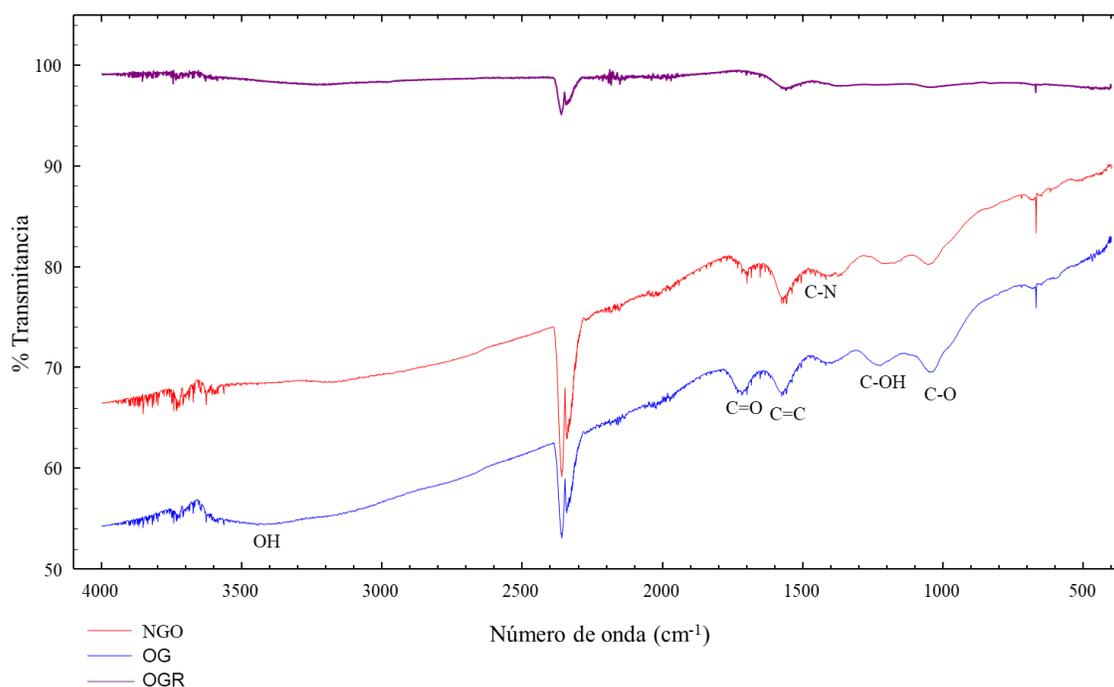


Figura 8. Análisis FTIR de las transformaciones químicas en óxido de grafeno dopado con nitrógeno y reducido.

La gráfica de FTIR (Fig. 8) muestra los espectros de óxido de grafeno (OG), óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NGO) y óxido de grafeno reducido (OGR), destacando los cambios en los grupos funcionales debido al dopaje con nitrógeno y la reducción. En el OG, se identifican bandas claves como la correspondiente al grupo hidroxilo (O-H) alrededor de 3400 cm^{-1} , que indica la presencia de grupos oxigenados en la superficie. Además, se observa un pico en $\sim 1720\text{ cm}^{-1}$, asociado con los grupos carbonilo (C=O) y un pico en $\sim 1620\text{ cm}^{-1}$, que corresponde a las vibraciones de los enlaces C=C en la estructura basal del grafeno. También se encuentran presentes las bandas de C-O y C-OH entre $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$, confirmando el estado altamente oxidado del material (Farzaneh et al., 2016).

En el caso del NGO, se mantienen la mayoría de las bandas observadas en el OG, pero se añade un pico importante en $\sim 1570\text{ cm}^{-1}$, correspondiente a las vibraciones de los enlaces C-N, lo que indica la incorporación exitosa de nitrógeno en la estructura del grafeno. Esto sugiere que el dopaje con nitrógeno ha modificado la química superficial del material (Farzaneh et al., 2016).

Por último, el espectro del OGR muestra una disminución notable en las intensidades de las bandas asociadas con los grupos funcionales oxigenados, como el C=O a $\sim 1720\text{ cm}^{-1}$ y los grupos C-O y C-OH entre $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$, lo que sugiere que el proceso de reducción ha eliminado una gran parte de estos grupos. Sin embargo, el pico en $\sim 1620\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a los enlaces C=C se mantiene, lo que indica que la estructura grafénica basal se ha preservado (Geng et al., 2011). Estos cambios en los espectros reflejan el éxito en la reducción del óxido de grafeno, restaurando parcialmente su estructura.

7.1.3 Difracción de rayos X (XRD)

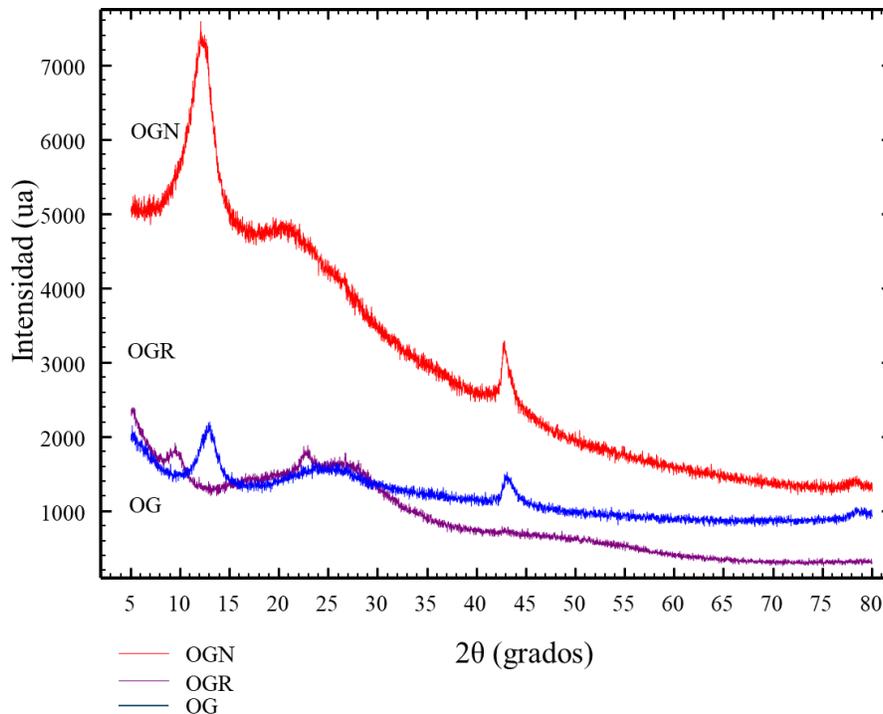


Figura 9. Análisis XRD de óxido de grafeno, dopado con nitrógeno y reducido. Cambios estructurales y cristalinidad.

La caracterización por difracción de rayos X (XRD) (Fig. 9) permitió evaluar las modificaciones estructurales en los materiales estudiados, óxido de grafeno (OG), óxido de grafeno reducido (OGR) y óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG). En el difractograma correspondiente al OG, se identificó un pico característico en $2\theta \approx 11^\circ$, asociado al plano cristalográfico (001). Este pico indica la presencia de grupos oxigenados que incrementan la distancia interplanar, alterando significativamente la estructura del grafeno respecto a su forma pura (Pei & Cheng, 2012).

El OGR presentó un pico a $2\theta \approx 26^\circ$, correspondiente al plano cristalográfico (002). Este cambio muestra la recuperación parcial de la estructura grafénica debido a la eliminación de los grupos funcionales oxigenados, resultando en una menor distancia interplanar y una mayor similitud con el grafeno puro (Singh et al., 2016).

Por otro lado, el NOG mostró un difractograma con un pico en $2\theta \approx 10^\circ-12^\circ$, también correspondiente al plano (001). Este pico sugiere que, aunque se mantienen algunos grupos oxigenados, el dopaje con nitrógeno introduce defectos adicionales en la red cristalina, alterando su periodicidad. Estos defectos, asociados a configuraciones piridínicas y pirrónicas, no solo afectan la distancia interplanar, sino que también modifican sus propiedades electrónicas y químicas (Yu et al., 2016).

7.1.4 Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)

Tabla 1. Composición elemental del óxido de grafeno dopado con nitrógeno. Análisis XPS

Elemento	Porcentaje Atómico
C	83.4
N	3.82
O	12.66
Na	0.12

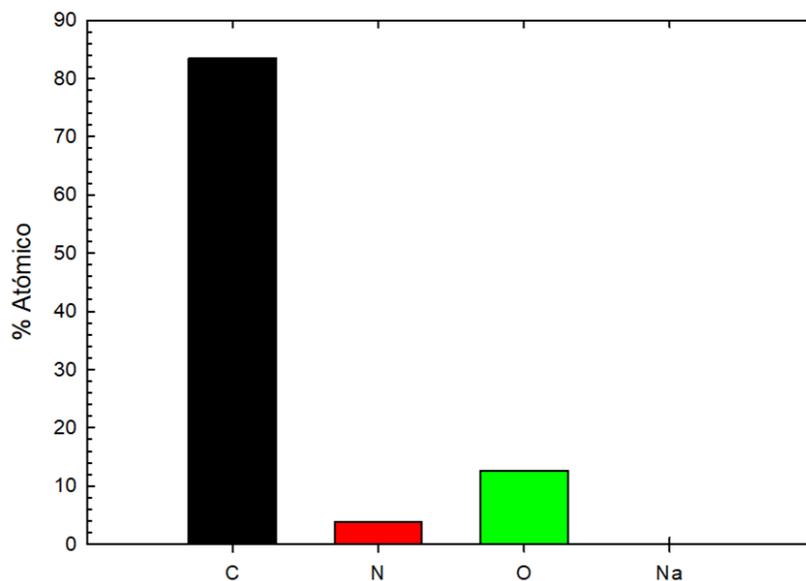


Figura 10. Porcentaje atómico obtenido por XPS.

Como se aprecia en la tabla 1 y Fig. 10, la espectroscopía XPS del óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG) revela una alta composición de carbono (83.4%), lo que indica que la estructura grafénica sigue siendo predominante. El nitrógeno, con un 3.82%, confirma el dopaje efectivo, mientras que el oxígeno (12.66%) sugiere la presencia de grupos funcionales oxigenados residuales. El sodio está presente en una cantidad mínima (0.12%), probablemente debido a impurezas del proceso. Estos resultados indican que el dopaje con nitrógeno ha sido exitoso, pero el material aún conserva grupos oxigenados que pueden influir en su reactividad química.

7.1.5 Caracterización morfológica y medición del tamaño de láminas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno

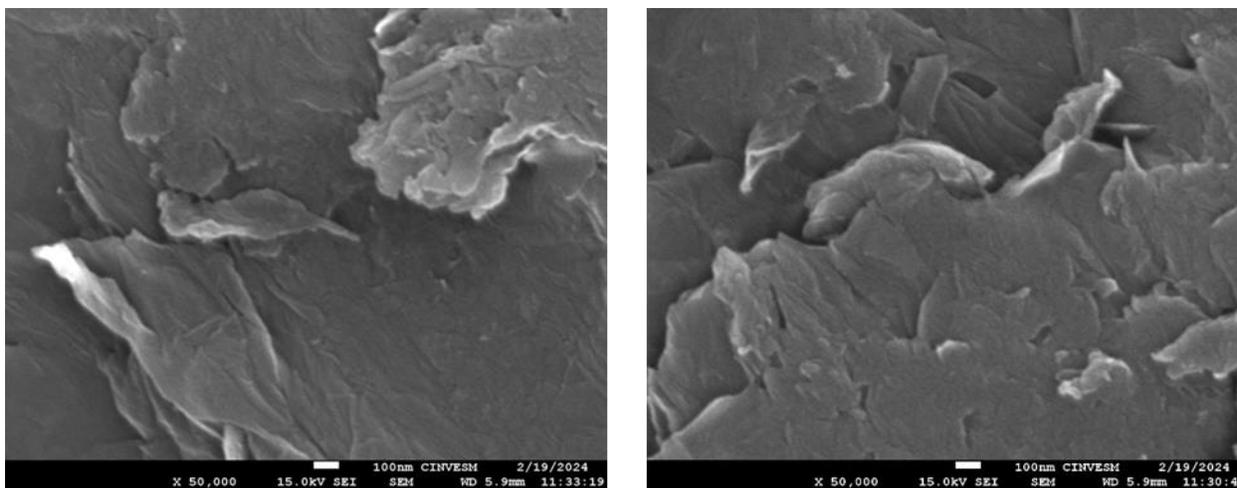


Figura 11. Dos imágenes de las láminas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno con presencia de una estructura multicapa.

La Fig. 11 muestra las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitieron observar la morfología superficial del óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG). A una magnificación de 50,000x, se apreciaron láminas superpuestas, características de las estructuras de grafeno, lo que confirma la presencia de una estructura multicapa con algunas rugosidades y pliegues en la superficie. Estas láminas exhiben una estructura relativamente uniforme, aunque se pueden observar algunas variaciones en el grosor a lo largo de las imágenes capturadas.

Además de la caracterización visual, se realizaron mediciones de las láminas utilizando el software ImageJ®. Las mediciones mostraron una variabilidad moderada en el ancho de las láminas de óxido de grafeno dopado, con valores que oscilan entre 15.108 nm y 26.287 nm. El valor promedio fue de 18.832 ± 3.030 nm, lo que indica una distribución relativamente uniforme del tamaño de las láminas.

7.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la germinación de rábano

7.2.1 Velocidad y porcentaje de germinación de semillas de rábano bajo tratamientos con óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno

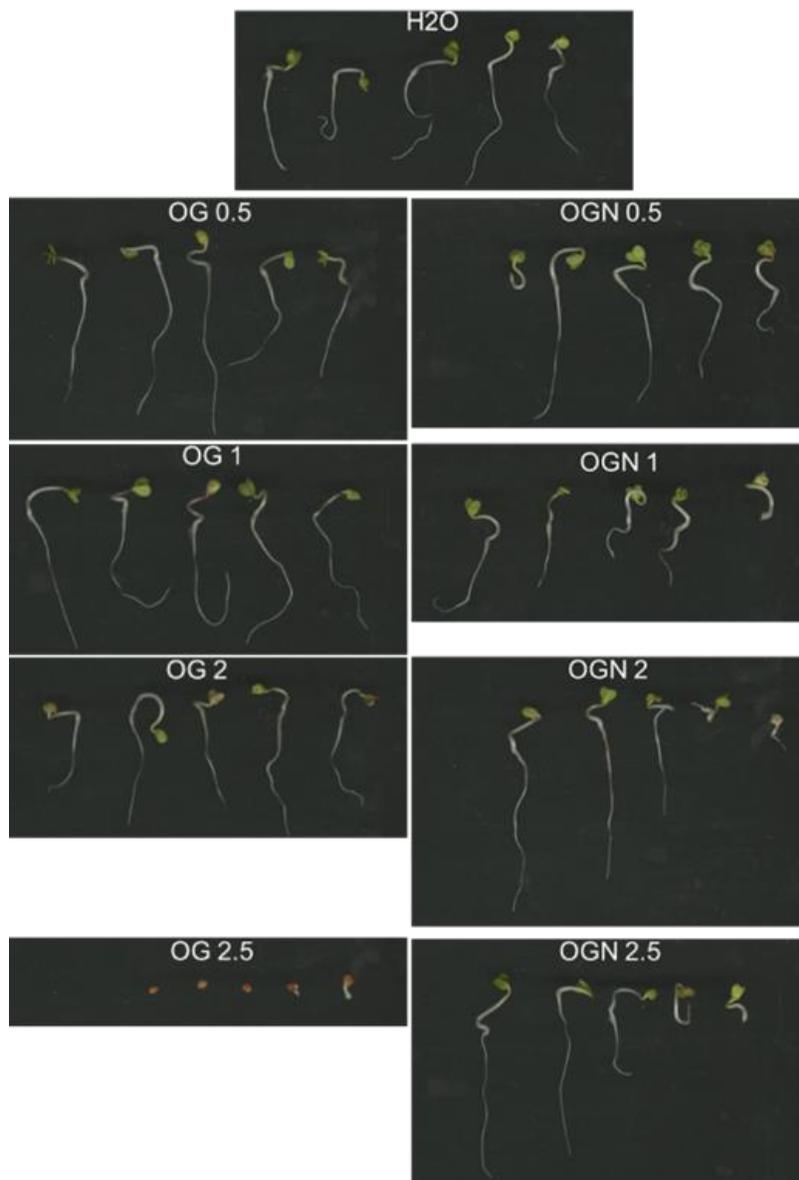


Figura 12. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.

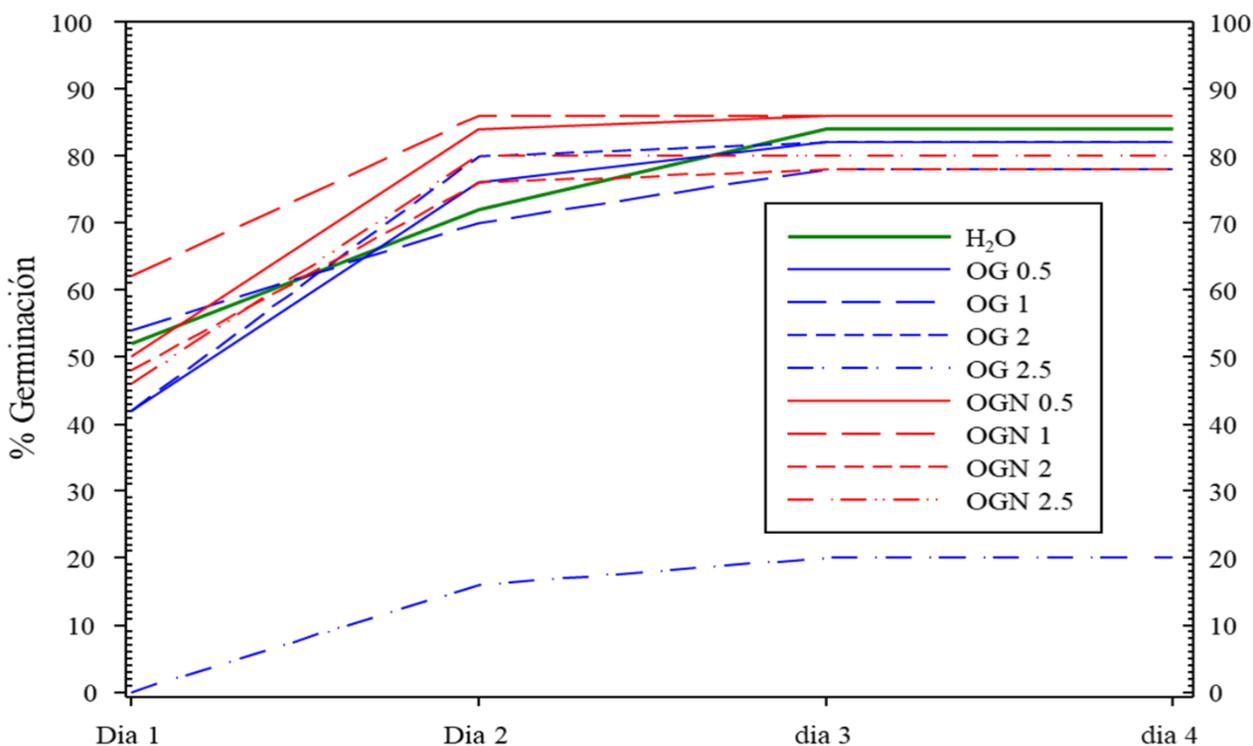


Figura 13. Curva acumulativa de germinación de las semillas de rábano expuestas a tratamiento con OG y OGN.

Tabla 2. índices de velocidad de germinación (IVG, GSI) y tasa media de germinación (MGR)

Tratamiento	p-Valor	Diferencia Significativa	IVG	GSI	MGR
H ₂ O	1.0	No	33.00	33.00	10.50
OG 0.5	1.0	No	30.50	30.50	10.25
OG 1	1.0	No	32.30	32.30	9.75
OG 2	1.0	No	30.80	30.80	10.25
OG 2.5	0.0003	Sí	4.70	4.70	2.50
OGN 0.5	1.0	No	33.80	33.80	10.75
OGN 1	1.0	No	37.00	37.00	10.75
OGN 2	1.0	No	31.30	31.30	9.75
OGN 2.5	1.0	No	31.50	31.50	10.00

El análisis estadístico mediante ANOVA reveló diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($F=6.59$, $p<0.001$), lo que indica que la respuesta en la germinación de las semillas de rábano fue influenciada por los diferentes tratamientos aplicados. En particular, el tratamiento con óxido de grafeno a una concentración de 2.5 mg/L (OG 2.5) mostró un desempeño

significativamente menor. En las figuras 12 y 13 se observa el efecto de los tratamientos en la germinación de semillas de rábano, con una clara diferenciación en la velocidad de germinación (tabla 2) entre los tratamientos con óxido de grafeno (OG), óxido de grafeno dopado con nitrógeno (OGN) y el control con agua (H₂O). El tratamiento control con agua alcanzó un 80% de germinación al tercer día, estableciendo una referencia base para la comparación con los otros tratamientos.

Las semillas de los tratamientos con OGN, especialmente a concentraciones más bajas (0.5 y 1 mg L⁻¹), mostraron una mayor velocidad de germinación en comparación con el control. El tratamiento con OGN a 0.5 mg L⁻¹ registró la mayor velocidad de germinación, alcanzando el 93% al cuarto día, seguido por el OGN a 1 mg L⁻¹ con un 90%, ambos por encima del control. Esto sugiere que, el dopaje con nitrógeno promueve una germinación más rápida y eficiente de las semillas, los resultados además muestran que estas dos concentraciones al segundo día alcanzaron más del 80% de germinación en comparación con el control. Incluso a concentraciones más altas (2 y 2.5mg L⁻¹), los tratamientos con OGN mantuvieron una alta velocidad de germinación, con valores entre 87% y 90%, demostrando su consistencia frente al control.

Por su parte, los tratamientos con OG mostraron una velocidad de germinación más lenta en comparación con el OGN y el control. El OG a 0.5 mg L⁻¹ alcanzó un 82% de germinación, apenas superior al control, mientras que a mayores concentraciones (1, 2, y 2.5mg L⁻¹), la velocidad de germinación fue inferior, oscilando entre 77% y 79%, quedando por debajo del rendimiento del control. Otro dato importante es que la concentración de 2.5 mg L⁻¹ de OG parece inhibir el proceso de germinación, mientras que la misma concentración de 2.5 mg L⁻¹ de NOG parece no tener efecto negativo, ya que alcanzó un 80% de germinación.

7.2.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de la raíz al tercer día de germinación

Las siguientes mediciones al tercer día marca típicamente la germinación visible en el control, con la emergencia de la radícula, que es un indicador clave del vigor de la semilla y su capacidad para

establecerse como plántula. La evaluación en el tercer día permite obtener datos tempranos sobre el efecto de las nanopartículas en la tasa de germinación y la longitud de las raíces, lo cual es crucial para entender su impacto inicial en el crecimiento. El cuarto día, por otro lado, representa una etapa en la que la germinación está más avanzada y se pueden observar cambios más pronunciados en las variables.

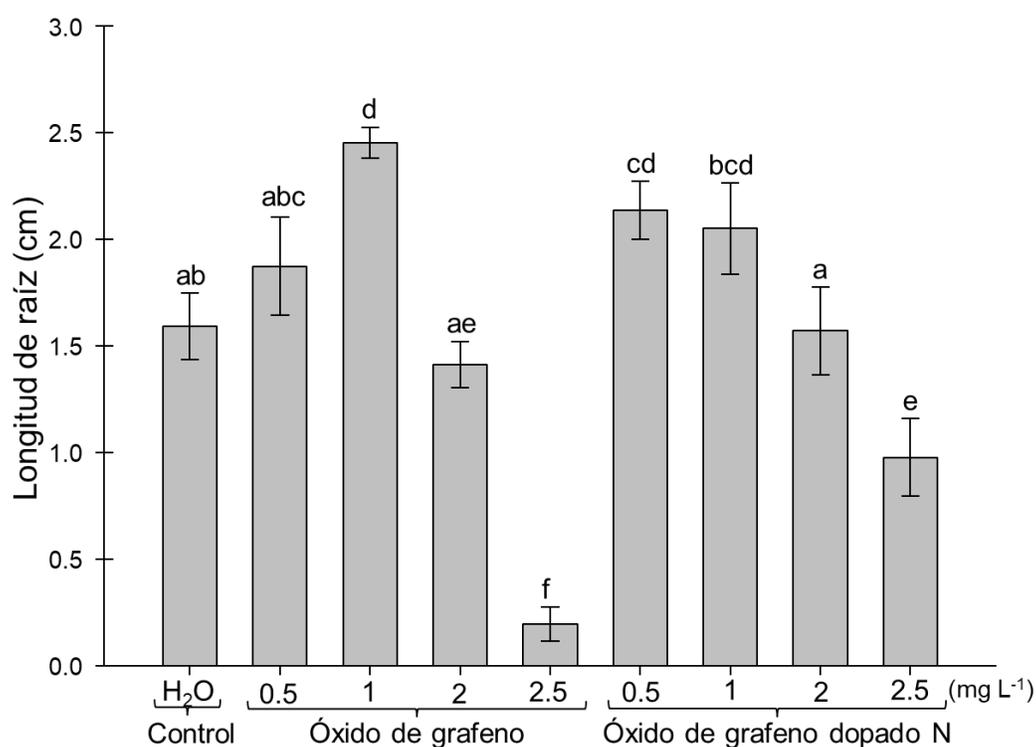


Figura 14. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.

En la Fig. 14 se observa el efecto del óxido de grafeno (OG) y óxido de grafeno dopado con nitrógeno (OGN) en la longitud de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.

Los resultados muestran que la longitud promedio de la raíz varió significativamente entre tratamientos y concentraciones aplicadas. El control con agua presentó una longitud promedio de aproximadamente 1.6 cm, y no mostró diferencias significativas con los tratamientos de 0.5 mg L⁻¹ de OG y 2 mg L⁻¹ de OGN (letras en común en el gráfico).

En los tratamientos con OG, la concentración de 1 mg L^{-1} promovió un crecimiento radicular significativo, alcanzando una longitud promedio de aproximadamente 2.7 cm, siendo el mayor valor registrado y estadísticamente diferente de todos los demás tratamientos. A 0.5 mg L^{-1} , la longitud de la raíz ($\approx 2.0 \text{ cm}$) fue significativamente mayor que la del control, pero no mostró diferencia con algunos tratamientos de OGN. A 2 mg L^{-1} , la longitud de la raíz ($\approx 1.5 \text{ cm}$) no difirió del control, mientras que a 2.5 mg L^{-1} , se registró la menor longitud de raíz ($\approx 0.2 \text{ cm}$), siendo estadísticamente inferior a todos los demás tratamientos.

Los tratamientos con OGN mostraron un patrón similar. A concentraciones de 0.5 mg L^{-1} y 1 mg L^{-1} , la longitud de la raíz fue significativamente mayor que en el control, con valores de $\approx 2.3 \text{ cm}$ y $\approx 2.2 \text{ cm}$, respectivamente, sin diferencias entre ellas. A 2 mg L^{-1} , la longitud de la raíz ($\approx 1.4 \text{ cm}$) fue similar a la del control, mientras que la concentración más alta de 2.5 mg L^{-1} resultó en una reducción drástica ($\approx 0.9 \text{ cm}$), siendo estadísticamente inferior a la mayoría de los tratamientos.

En resumen, las concentraciones de 1 mg L^{-1} de OG y $0.5\text{--}1 \text{ mg L}^{-1}$ de OGN promovieron un crecimiento radicular superior al del control, mientras que la concentración más alta de 2.5 mg L^{-1} de ambos compuestos inhibió significativamente el desarrollo de la raíz. Los demás tratamientos no mostraron diferencias significativas respecto al control o entre ellos.

7.2.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno el área de la raíz al tercer día de germinación

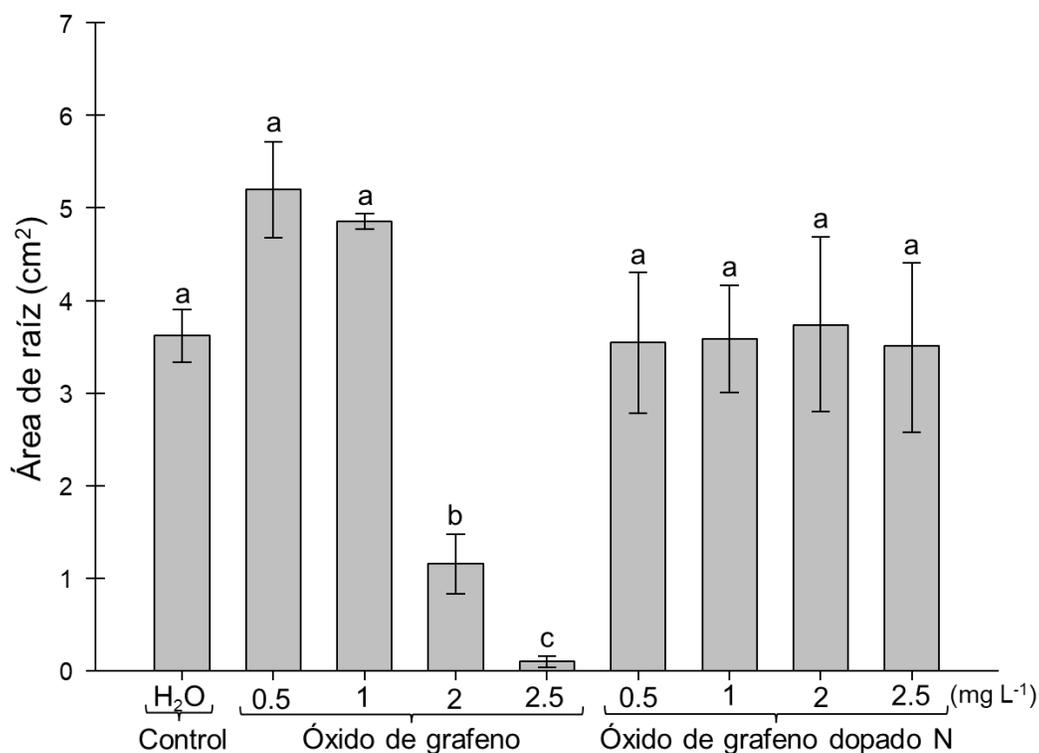


Figura 15. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.

En la Fig. 15 vemos los resultados que muestran que el área promedio de la raíz varió entre tratamientos y concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un área promedio de aproximadamente 4.2 cm², sin diferencias significativas con los tratamientos de 0.5 mg L⁻¹ y 1 mg L⁻¹ de OG ni con todas las concentraciones de OGN.

En los tratamientos con OG, las concentraciones de 0.5 mg L⁻¹ y 1 mg L⁻¹ promovieron un área radicular mayor (≈5.5 cm² y ≈5.3 cm², respectivamente), sin diferencias significativas con el control. Sin embargo, a 2 mg L⁻¹, se observó una disminución significativa en el área radicular (≈1.5 cm²), mientras que a 2.5 mg L⁻¹, se registró el valor más bajo (≈0.2 cm²), siendo significativamente menor que todos los demás tratamientos, lo que sugiere un efecto tóxico a esa dosis.

Los tratamientos con OGN no mostraron diferencias significativas entre sí ni con el control, con valores promedio de área de raíz que oscilaron entre 3.9 y 4.7 cm².

7.2.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz al tercer día de germinación

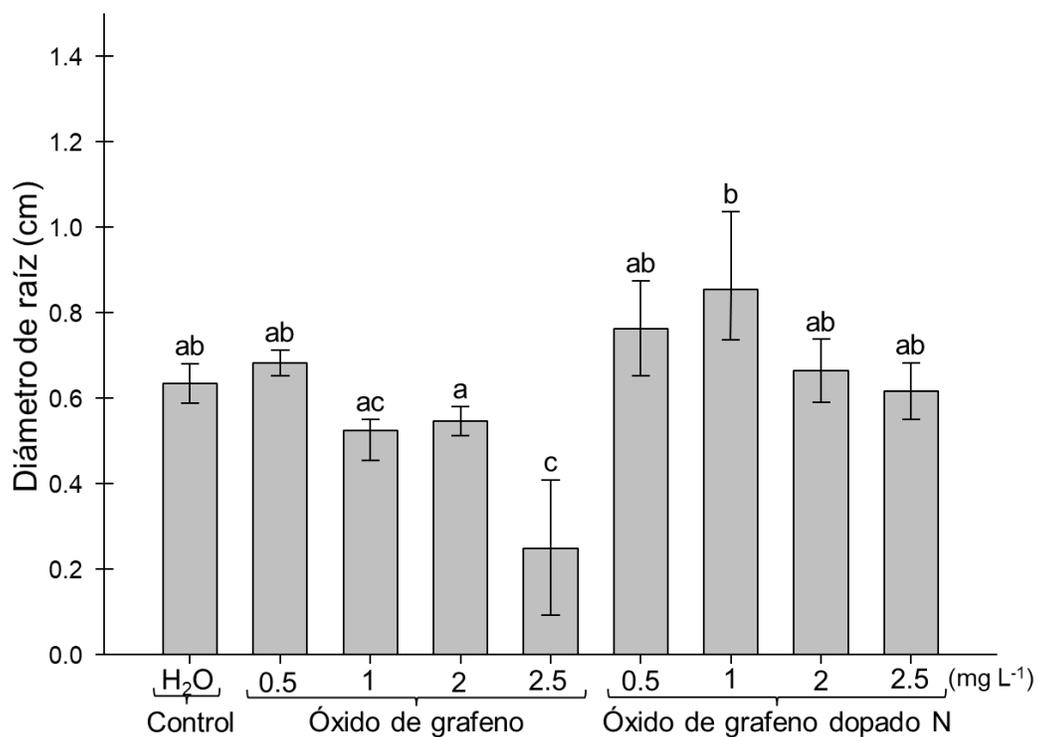


Figura 16. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.

En los resultados mostrados en la Fig. 16 podemos apreciar que el diámetro promedio de la raíz varió entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un diámetro promedio de 0.65 cm, sin diferencias significativas con la mayoría de los tratamientos, excepto 2.5 mg L⁻¹ de OG, que mostró la menor medida (≈ 0.25 cm, $p < 0.05$), y 1 mg L⁻¹ de OGN, que registró el mayor diámetro (≈ 0.85 cm).

En los tratamientos con OG, 0.5, 1 y 2 mg L⁻¹ no mostraron diferencias significativas con el control. Sin embargo, 2.5 mg L⁻¹ redujo significativamente el diámetro radicular.

Los tratamientos con OGN mostraron un efecto positivo a 1 mg L⁻¹, aumentando el diámetro de la raíz significativamente en comparación con el control y otros tratamientos. Las concentraciones de 0.5, 2 y 2.5 mg L⁻¹ no difirieron del control.

7.2.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud por volumen de la raíz al tercer día de germinación

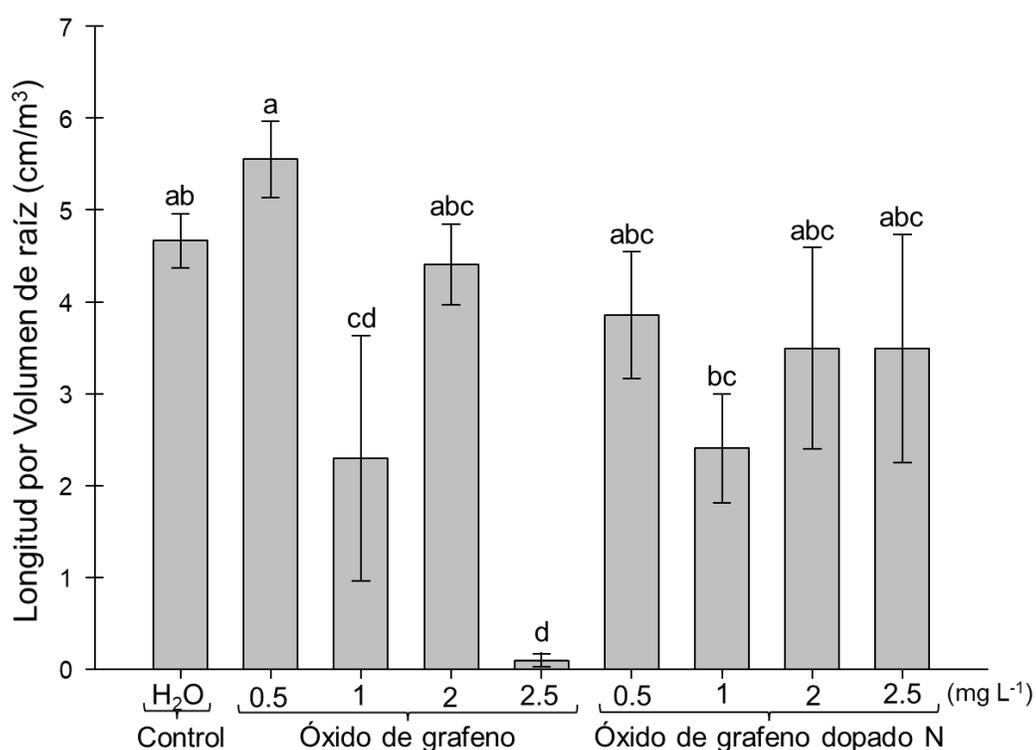


Figura 17. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud por volumen de la raíz de plántulas de rábano al tercer día de germinación.

En los resultados mostrados en la Fig. 17, podemos apreciar que la relación longitud por volumen de raíz varió entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de 4.8 cm/m³, sin diferencias significativas con 2 mg L⁻¹ de OG y las concentraciones de 0.5, 2 y 2.5 mg L⁻¹ de OGN. Sin embargo, 1 mg L⁻¹ de OGN mostró una

disminución significativa ($\approx 2.8 \text{ cm/m}^3$, $p < 0.05$) en comparación con el control, mientras que 1 mg L^{-1} de OG también redujo este parámetro ($\approx 2.3 \text{ cm/m}^3$, $p < 0.05$). La menor relación longitud por volumen de raíz se registró en 2.5 mg L^{-1} de OG ($\approx 0.2 \text{ cm/m}^3$, $p < 0.05$).

En los tratamientos con OG, 0.5 mg L^{-1} promovió el mayor valor de longitud por volumen de raíz ($\approx 5.8 \text{ cm/m}^3$), siendo significativamente mayor que 1 mg L^{-1} y 2.5 mg L^{-1} de OG, pero sin diferencias con el control.

Los tratamientos con OGN mostraron valores similares al control en 0.5 , 2 y 2.5 mg L^{-1} , mientras que 1 mg L^{-1} redujo significativamente este parámetro.

7.2.6 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de la raíz al cuarto día de germinación

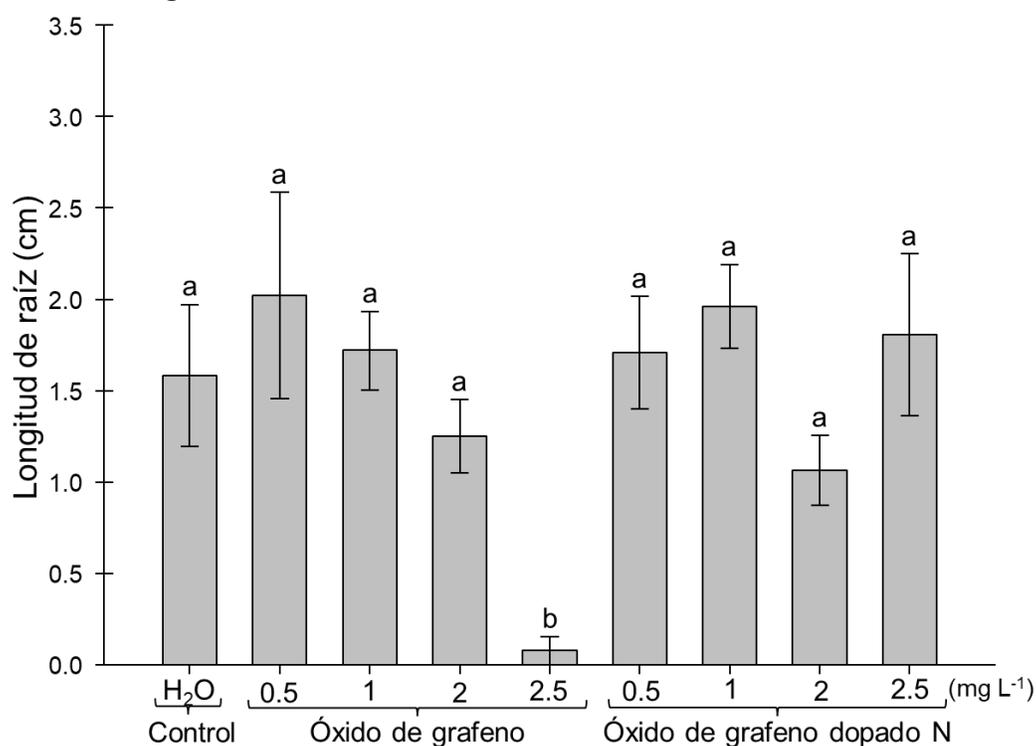


Figura 18. Efecto del Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Dopado con Nitrógeno en la longitud de la Raíz de Plántulas de Rábano al cuarto día de germinación

El experimento evaluó el efecto del óxido de grafeno (OG) y óxido de grafeno dopado con nitrógeno (OGN) en la longitud de la raíz de plántulas de rábano al cuarto día de germinación,

comparando los tratamientos con un control de agua (H_2O). Los resultados muestran que el control, con una longitud promedio de 1.8 cm, no presentó diferencias significativas con los tratamientos de OG a 0.5, 1 y 2 $mg L^{-1}$, ni con ninguna de las concentraciones de OGN, ya que todos compartieron la misma letra estadística ("a"), lo que indica que estos tratamientos no afectaron la longitud de la raíz. Sin embargo, el tratamiento con OG a 2.5 $mg L^{-1}$ redujo significativamente la longitud de la raíz a aproximadamente 0.5 cm (letra "b"), sugiriendo un efecto adverso a esta concentración. En conclusión, concentraciones bajas y moderadas de OG y todas las concentraciones de OGN no afectaron significativamente el crecimiento de la raíz, mientras que una concentración alta de OG (2.5 $mg L^{-1}$) tuvo un impacto negativo. Todos estos resultados los podemos observar en la Fig. 18.

7.2.7 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área de la raíz al cuarto día de germinación

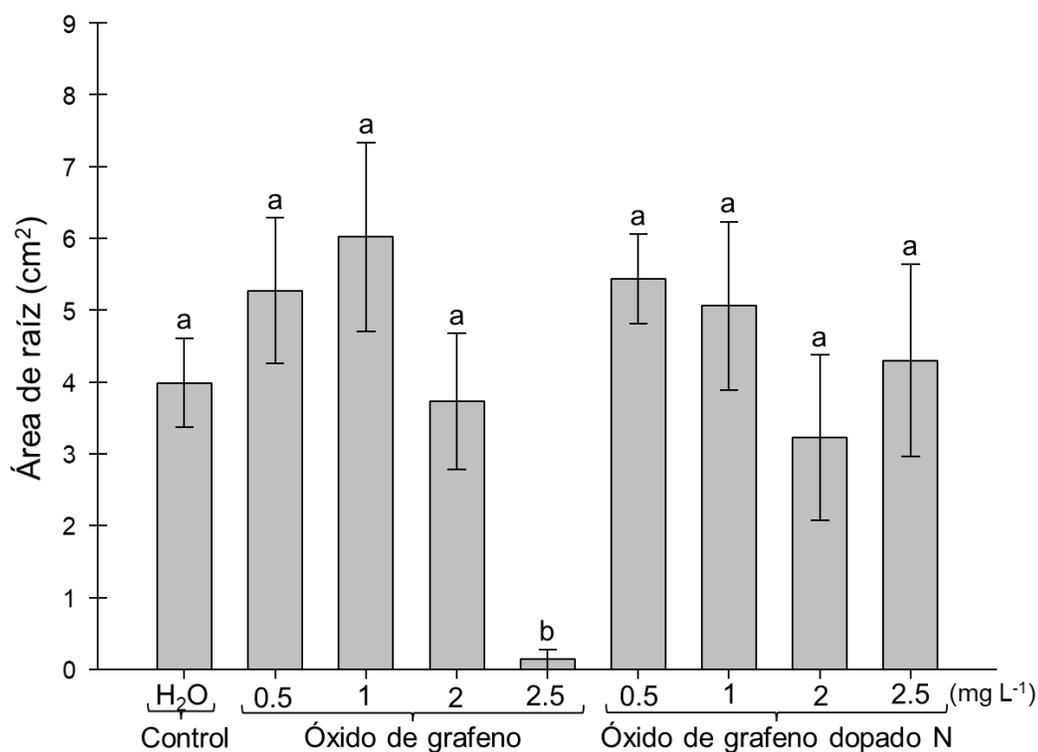


Figura 19. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área de la raíz de plántulas de rábano al cuarto día de germinación.

Los resultados (Fig. 19) muestran que el control, con un área promedio de 4.5 cm^2 , no presentó diferencias significativas con los tratamientos de OG a 0.5 , 1 y 2 mg L^{-1} , ni con ninguna de las concentraciones de OGN, ya que todos compartieron la misma letra estadística ("a"), lo que indica que estos tratamientos no afectaron el área de la raíz. Sin embargo, el tratamiento con OG a 2.5 mg L^{-1} redujo significativamente el área de la raíz a aproximadamente 0.5 cm^2 (letra "b"), lo que sugiere un efecto adverso a esta concentración.

7.2.8 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz al cuarto día de germinación

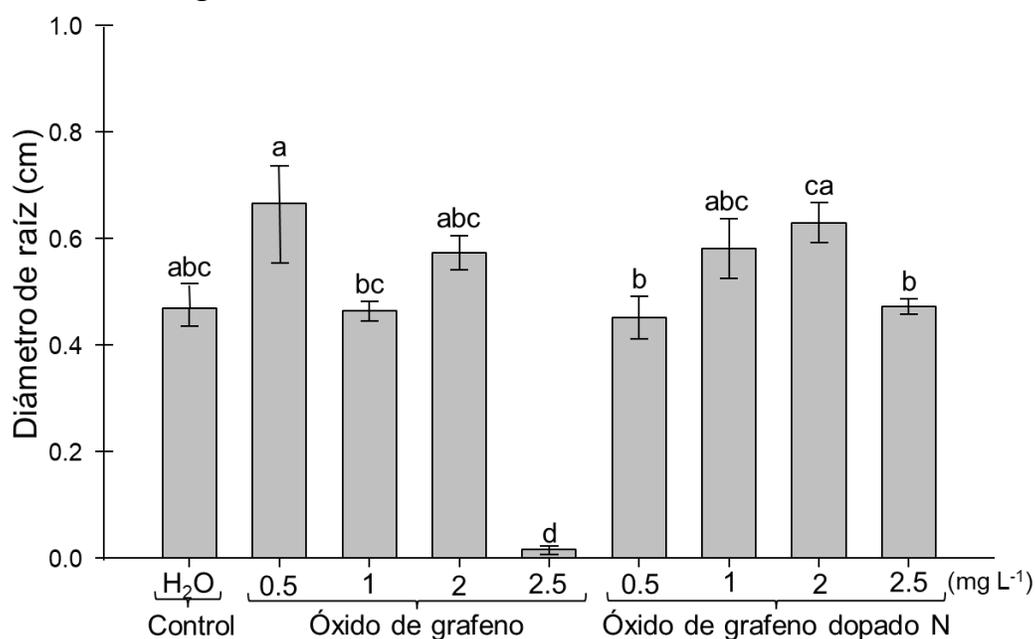


Figura 20. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz de plántulas de rábano al cuarto día de germinación.

En los resultados mostrados en la Fig. 20, se observa que el diámetro promedio de la raíz varió entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un diámetro promedio de 0.48 cm , sin diferencias significativas con 1 mg L^{-1} y 2 mg L^{-1} de OG, así como con 1 mg L^{-1} de OGN.

En los tratamientos con OG, la concentración de 0.5 mg L^{-1} promovió el mayor diámetro radicular ($\approx 0.68 \text{ cm}$, $p < 0.05$), siendo significativamente mayor que el control y otros tratamientos. En

contraste, 2.5 mg L⁻¹ de OG presentó el menor diámetro (≈ 0.05 cm, $p < 0.05$), siendo estadísticamente inferior a todos los demás tratamientos.

En los tratamientos con OGN, la concentración de 2 mg L⁻¹ mostró el mayor diámetro (≈ 0.65 cm), sin diferencias significativas con 0.5 mg L⁻¹ y 1 mg L⁻¹ de OGN, pero mayor que el control y 2.5 mg L⁻¹ de OGN (≈ 0.38 cm, $p < 0.05$).

7.2.9 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de la raíz al cuarto día de germinación

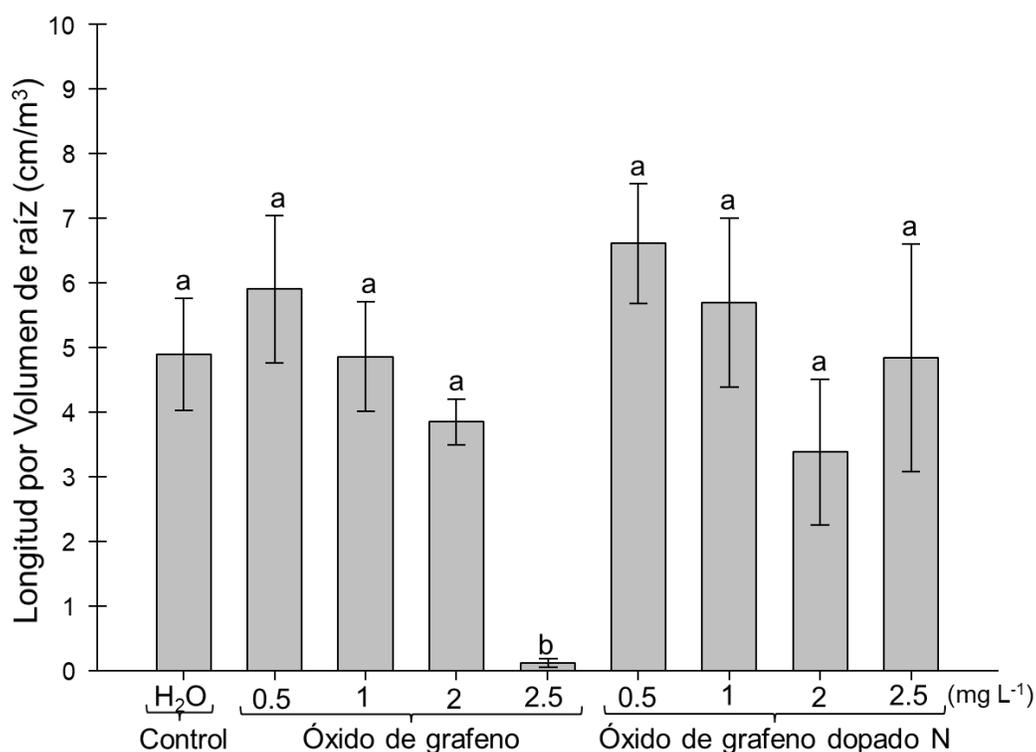


Figura 21. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud por volumen de la raíz de plántulas de rábano al cuarto día de germinación.

Los resultados en la Fig. 21 muestran que el control, con una longitud promedio de 5 cm/m³, no presentó diferencias significativas con los tratamientos de OG a 0.5, 1 y 2 mg L⁻¹, ni con ninguna de las concentraciones de OGN (0.5, 1, 2 y 2.5 mg L⁻¹), ya que todos compartieron la letra "a". Sin

embargo, el tratamiento con OG a 2.5 mg L^{-1} redujo significativamente la longitud por volumen de raíz a cerca de 0.05 cm/m^3 (letra "b"), sugiriendo un efecto adverso a esta concentración.

7.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico al cuarto día de germinación de rábano

7.3.1 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de carbohidratos totales al cuarto día de germinación

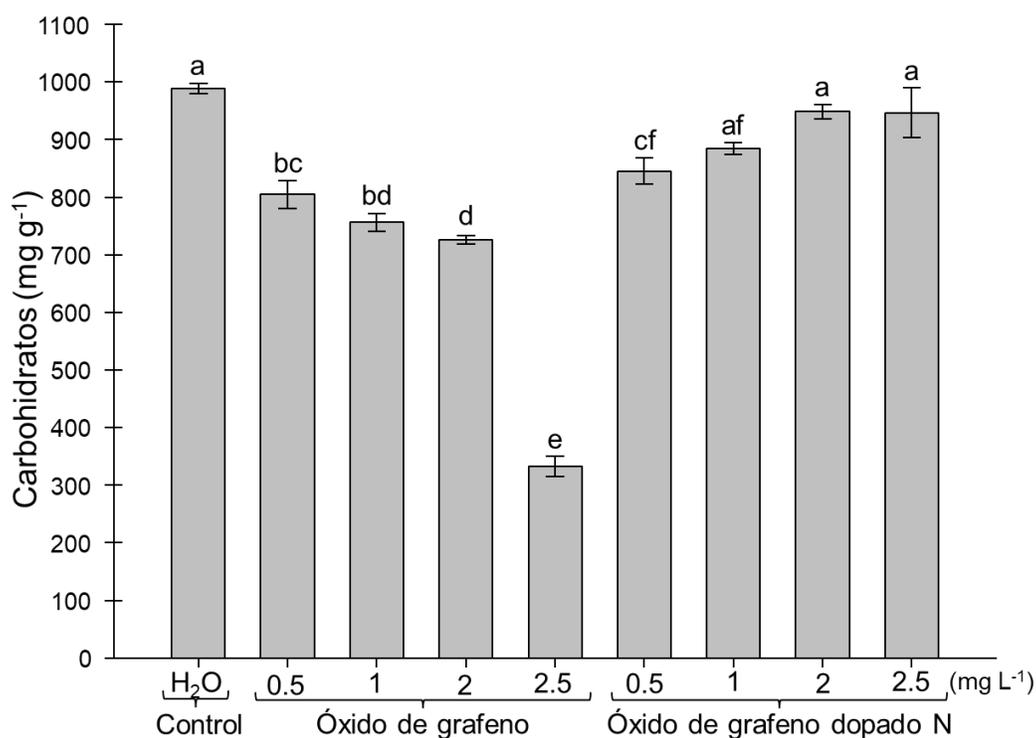


Figura 22. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de carbohidratos del germinado de rábano al cuarto día de germinación.

En los resultados mostrados en la Fig. 22, se observa que la concentración de carbohidratos varió entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de $\approx 1000 \text{ mg g}^{-1}$, sin diferencias significativas con 2 mg L^{-1} y 2.5 mg L^{-1} de OGN.

En los tratamientos con OG, se observó una reducción progresiva en la concentración de carbohidratos conforme aumentó la concentración. A 0.5 mg L^{-1} , los valores disminuyeron

significativamente en comparación con el control ($\approx 800 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), mientras que a 1 mg L^{-1} y 2 mg L^{-1} , la reducción fue más acentuada ($\approx 750 \text{ mg g}^{-1}$ y $\approx 700 \text{ mg g}^{-1}$, respectivamente). A 2.5 mg L^{-1} , se registró el valor más bajo ($\approx 350 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior a todos los tratamientos.

En los tratamientos con OGN, 1 mg L^{-1} , 2 mg L^{-1} y 2.5 mg L^{-1} mantuvieron valores similares al control ($\approx 950\text{--}1000 \text{ mg g}^{-1}$), sin diferencias significativas. En cambio, 0.5 mg L^{-1} de OGN mostró una ligera reducción en comparación con el control ($\approx 850 \text{ mg g}^{-1}$), pero sin diferencias significativas con algunas concentraciones de OG.

7.3.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de proteínas totales al cuarto día de germinación

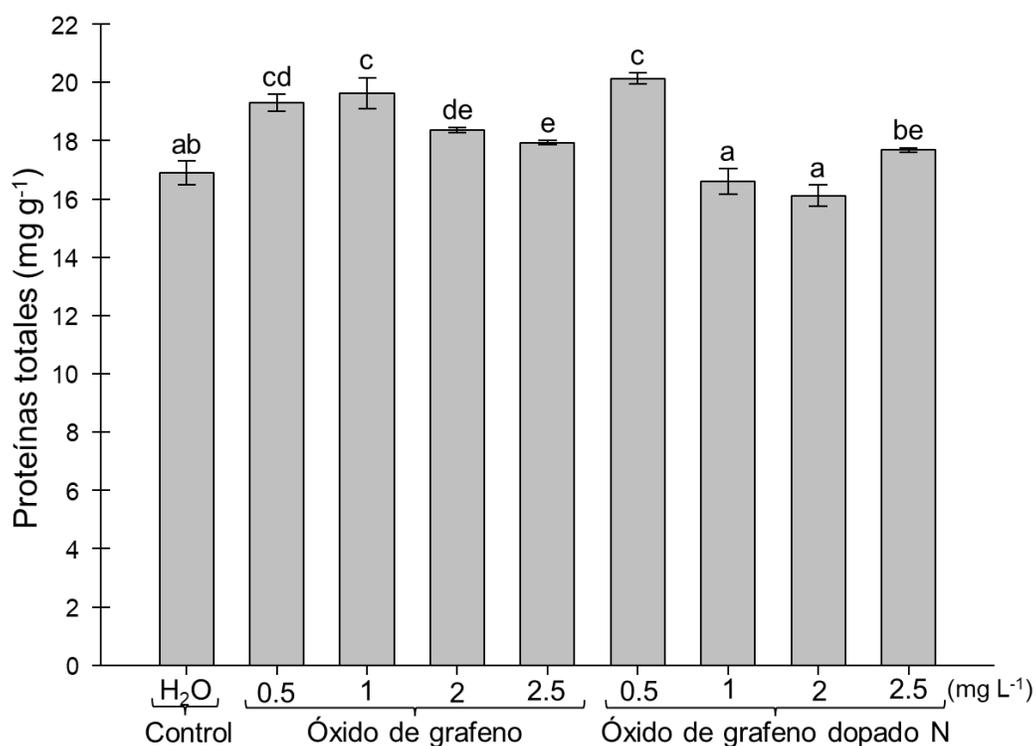


Figura 23. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de proteínas del germinado de rábano al cuarto día de germinación.

En los resultados mostrados en la Fig. 23, se observa que la concentración de proteínas totales varió entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de $\approx 17 \text{ mg g}^{-1}$, sin diferencias significativas con 2 mg L^{-1} y 2.5 mg L^{-1} de OGN.

En los tratamientos con OG, 0.5 , 1 y 2 mg L^{-1} mostraron un incremento en la concentración de proteínas en comparación con el control, con valores entre 18 y 20 mg g^{-1} . La mayor concentración de proteínas se registró en 2 mg L^{-1} de OG ($\approx 20.5 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), significativamente superior al control y a los tratamientos con OGN. En cambio, 2.5 mg L^{-1} de OG mostró una reducción significativa en la concentración de proteínas ($\approx 17.5 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$).

En los tratamientos con OGN, 0.5 mg L^{-1} presentó la menor concentración de proteínas ($\approx 16 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), mientras que 1 mg L^{-1} y 2 mg L^{-1} mantuvieron valores similares al control. 2.5 mg L^{-1} de OGN mostró un ligero aumento en la concentración de proteínas ($\approx 18 \text{ mg g}^{-1}$), sin diferencias significativas con algunos tratamientos de OG.

7.3.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de lípidos totales al cuarto día de germinación

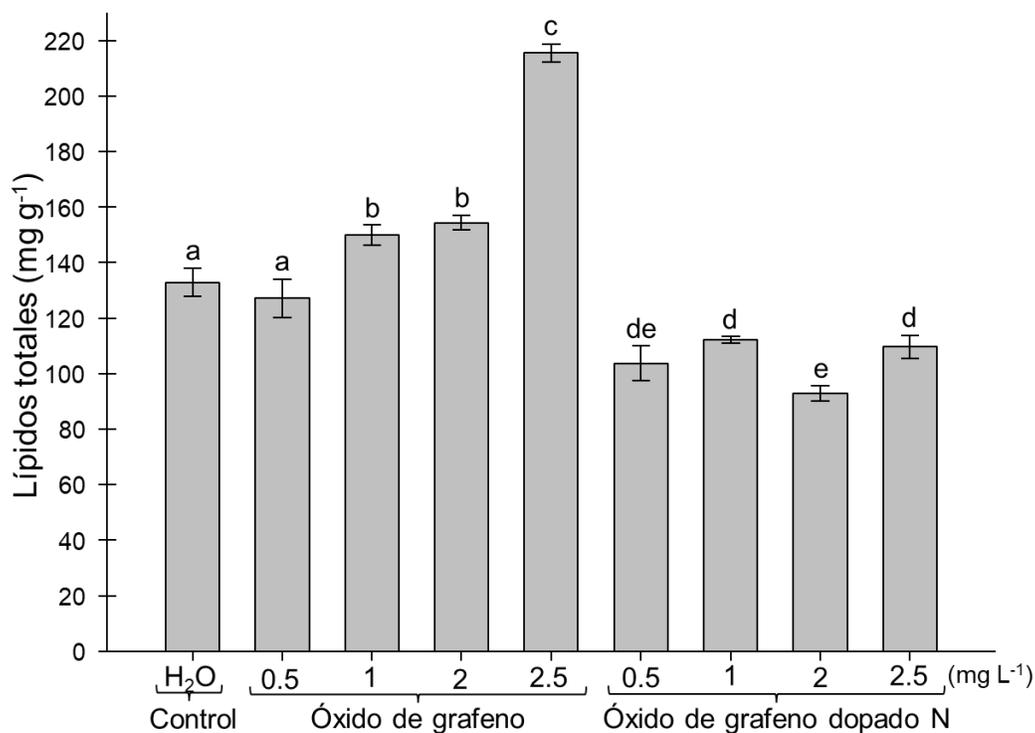


Figura 24. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de lípidos del germinado de rábano al cuarto día de germinación.

En los resultados mostrados en la Fig. 24, se observa que la concentración de lípidos totales varió entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de $\approx 135 \text{ mg g}^{-1}$, sin diferencias significativas con 0.5 mg L^{-1} de OG.

En los tratamientos con OG, 1 y 2 mg L^{-1} mostraron un aumento significativo en la concentración de lípidos ($\approx 155\text{--}160 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$) en comparación con el control. La mayor concentración de lípidos se registró en 2.5 mg L^{-1} de OG ($\approx 210 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), siendo significativamente superior a todos los demás tratamientos.

En los tratamientos con OGN, se observó una reducción en la concentración de lípidos en comparación con el control y con los tratamientos con OG. 0.5 mg L^{-1} y 2.5 mg L^{-1} de OGN presentaron valores similares ($\approx 110\text{--}115 \text{ mg g}^{-1}$), mientras que 1 mg L^{-1} de OGN mostró una ligera

disminución ($\approx 105 \text{ mg g}^{-1}$). La menor concentración de lípidos se registró en 2 mg L^{-1} de OGN ($\approx 95 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a todos los tratamientos con OG.

7.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en las variables fisiológicas y morfométricas

7.4.1 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la altura de la planta

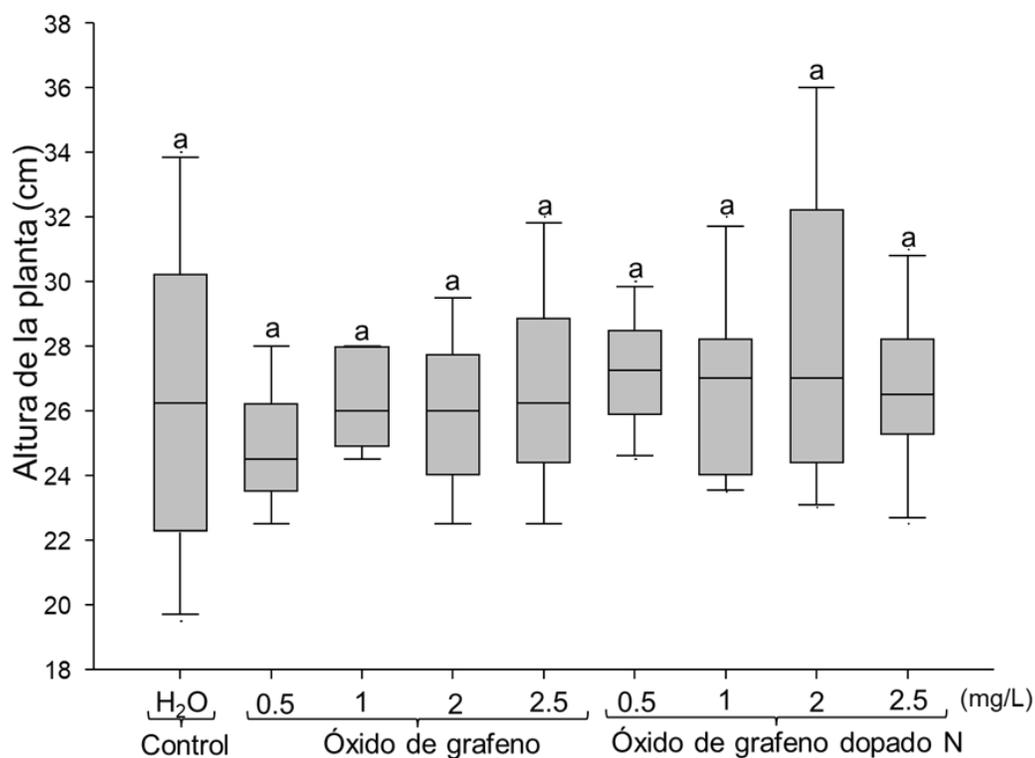


Figura 25. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en altura de la planta de rábano

Los resultados (Fig. 25) del análisis indicaron que no hubo diferencias significativas entre el control con agua (H₂O), que tuvo una altura promedio de 26 cm y los tratamientos con OG y OGN a diferentes concentraciones (0.5, 1, 2 y 2.5 mg L⁻¹). Las alturas promedio de las plantas en los tratamientos variaron entre 22 cm y 30 cm, pero todos los tratamientos compartieron la misma letra ("a"), lo que sugiere que ni el OG ni el OGN, a las concentraciones probadas, tuvieron un impacto significativo en la altura de las plantas de rábano al final del experimento.

7.4.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el número de hojas

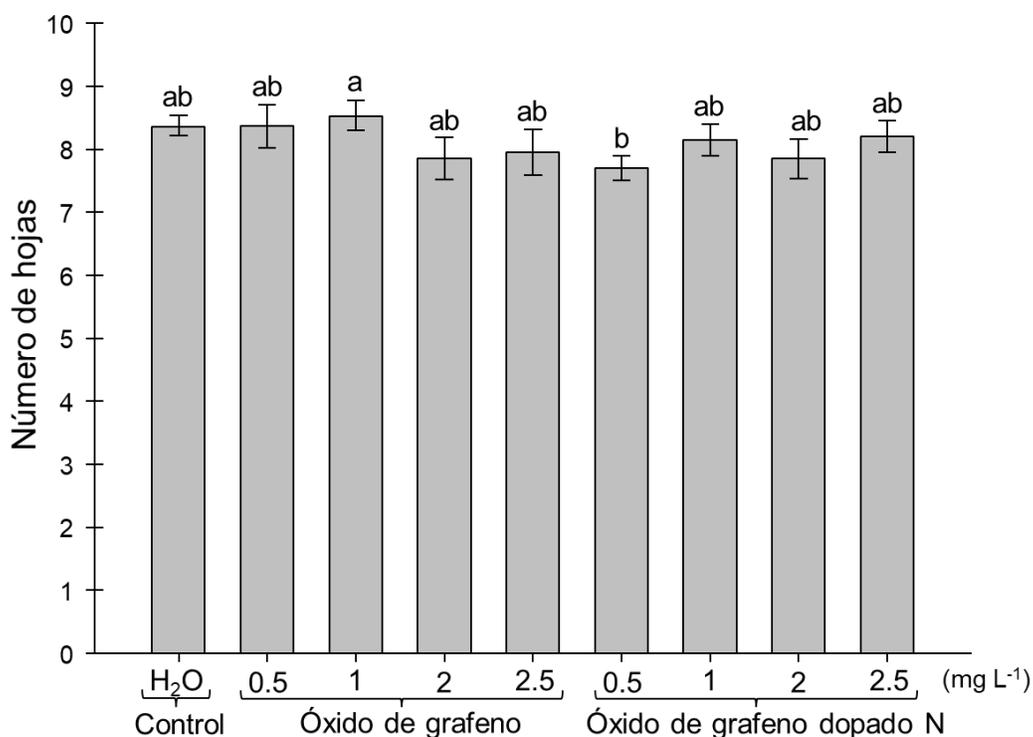


Figura 26. Efecto del Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Dopado con Nitrógeno número de hojas de la planta de rábano.

En los resultados mostrados en la Fig. 26, se observa que el número de hojas varió ligeramente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de 8.3 hojas, sin diferencias significativas con la mayoría de los tratamientos.

En los tratamientos con OG, 1 mg L⁻¹ mostró el mayor número de hojas (≈8.6 hojas), aunque sin diferencias significativas con el control ni con otras concentraciones. La menor cantidad de hojas se registró en 2 mg L⁻¹ de OG (≈7.5 hojas, $p < 0.05$), siendo significativamente menor que 1 mg L⁻¹ de OG.

En los tratamientos con OGN, no se observaron diferencias significativas entre las concentraciones aplicadas ni con el control, con valores promedio entre 8.0 y 8.4 hojas.

7.4.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el área foliar

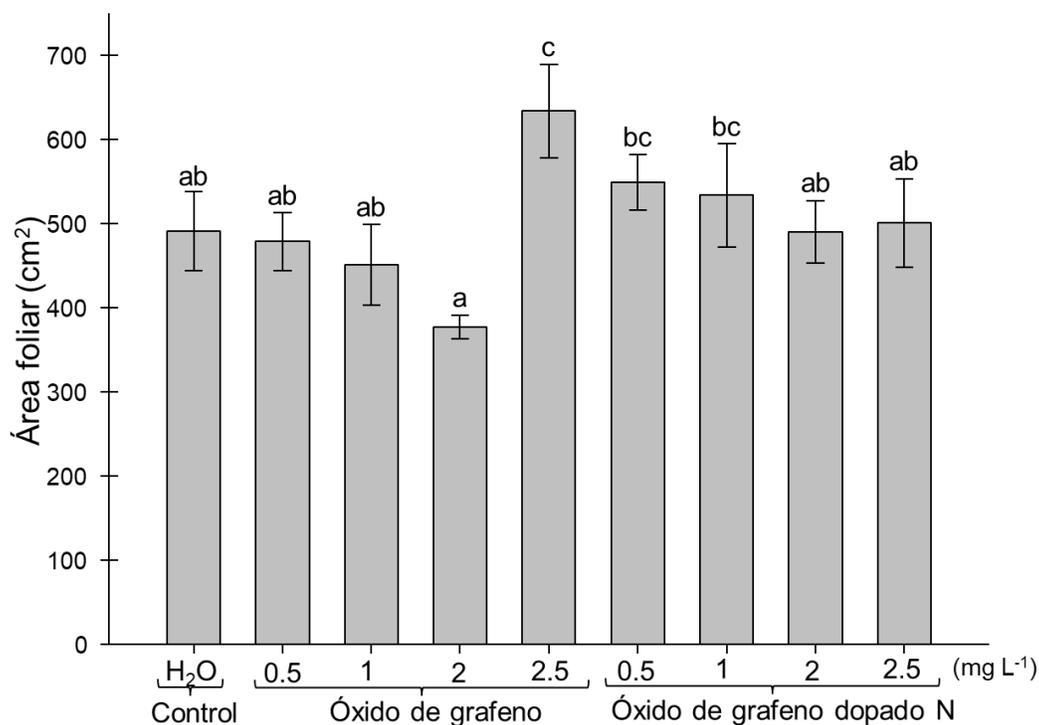


Figura 27. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno área foliar de la planta de rábano

En los resultados mostrados en la Fig. 27, se observa que el área foliar varió significativamente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de $\approx 500 \text{ cm}^2$, sin diferencias significativas con 0.5 mg L^{-1} , 1 mg L^{-1} y 2.5 mg L^{-1} de OG, así como con todas las concentraciones de OGN, excepto 0.5 mg L^{-1} .

En los tratamientos con OG, 2 mg L^{-1} mostró el menor valor de área foliar ($\approx 350 \text{ cm}^2$, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior a la mayoría de los tratamientos. En contraste, 2.5 mg L^{-1} de OG presentó el mayor valor registrado ($\approx 650 \text{ cm}^2$, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control y a los demás tratamientos.

En los tratamientos con OGN, 0.5 mg L^{-1} y 1 mg L^{-1} promovieron un aumento moderado en el área foliar ($\approx 580 \text{ cm}^2$ y $\approx 570 \text{ cm}^2$, respectivamente), sin diferencias significativas con el control ni con otras concentraciones de OGN.

7.4.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro del rábano

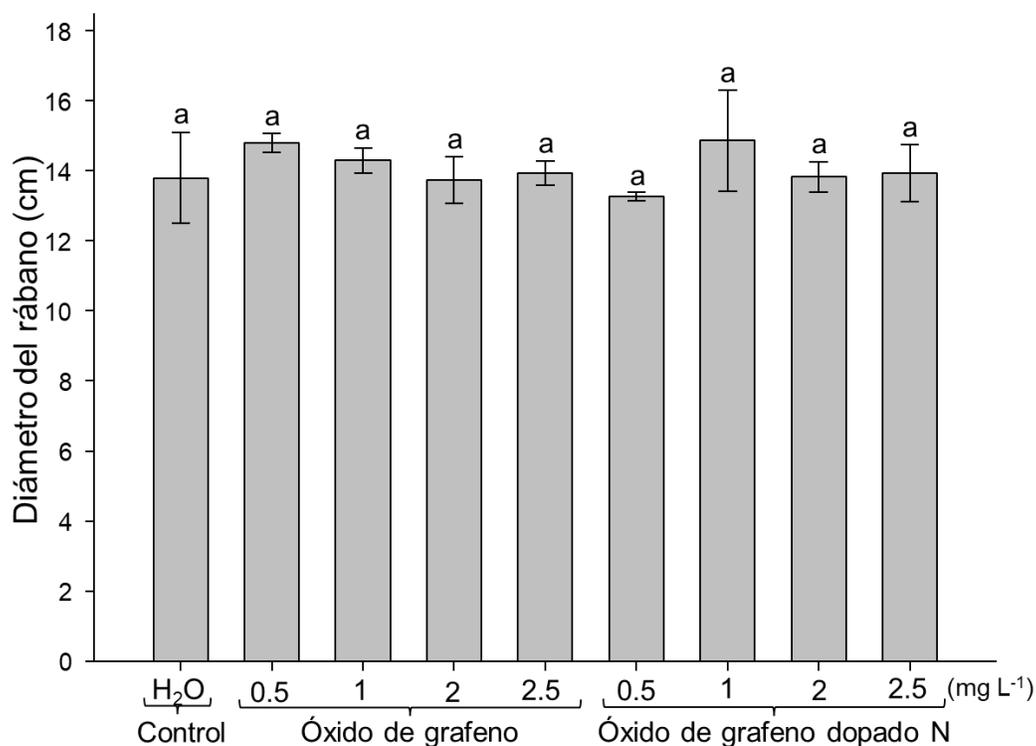


Figura 28. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el diámetro de rábano.

Los resultados (Fig. 28) indicaron que no hubo diferencias significativas en el diámetro promedio del bulbo entre el control con agua (H₂O), que tuvo un promedio de 14 cm, y los tratamientos con OG y OGN en todas las concentraciones probadas (0.5, 1, 2 y 2.5 mg L⁻¹), cuyos diámetros oscilaron entre 13 y 15 cm. Todas las barras compartieron la misma letra estadística ("a"), lo que sugiere que ni el OG ni el OGN, en ninguna de las concentraciones, tuvieron un impacto significativo en el tamaño del bulbo de las plantas de rábano al finalizar el experimento.

7.4.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud del rábano

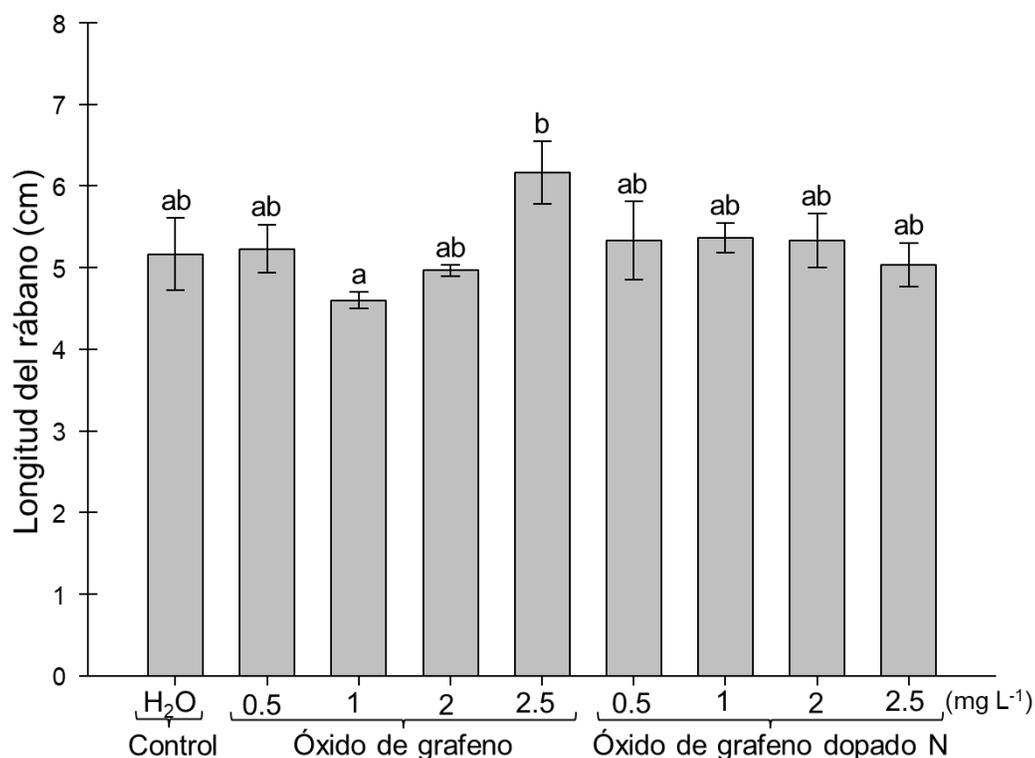


Figura 29. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la longitud de rábano.

En los resultados mostrados en la Fig. 29, se observa que la longitud del rábano varió ligeramente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de ≈ 5.2 cm, sin diferencias significativas con la mayoría de los tratamientos.

En los tratamientos con OG, 1 mg L⁻¹ mostró la menor longitud del rábano (≈ 4.6 cm, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior a algunos tratamientos con OGN. En contraste, 2.5 mg L⁻¹ de OG presentó el mayor valor registrado (≈ 6.2 cm, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control y a la mayoría de los tratamientos.

En los tratamientos con OGN, no se observaron diferencias significativas entre las concentraciones aplicadas ni con el control, con valores promedio entre 5.1 y 5.5 cm.

7.4.6 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco del rábano

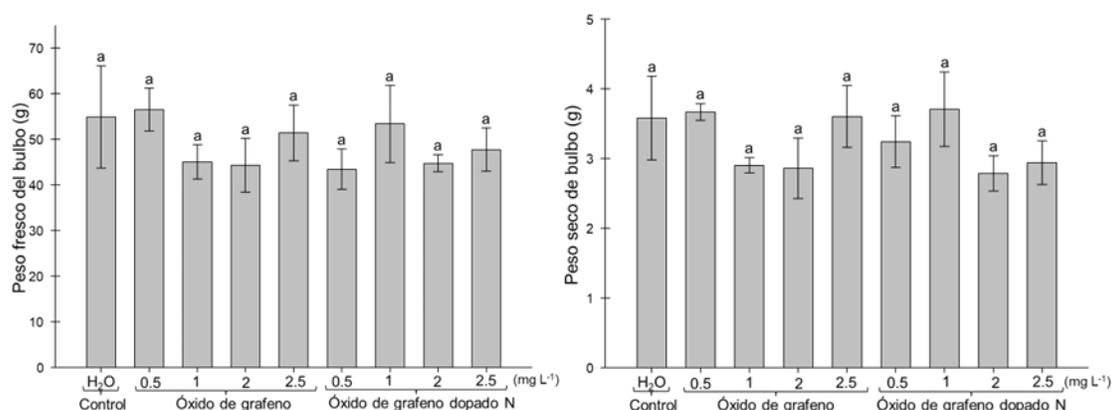


Figura 30. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco del rábano.

Los resultados (Fig. 30) indicaron que no hubo diferencias significativas en el peso fresco del bulbo entre el control con agua (H₂O), que tuvo un promedio de 60 g y los tratamientos con OG y OGN en todas las concentraciones probadas (0.5, 1, 2 y 2.5 mg L⁻¹). De manera similar, el peso seco del bulbo, con un promedio de 4 g en el control, tampoco mostró diferencias significativas en comparación con los tratamientos de OG y OGN en todas las concentraciones.

7.4.7 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco de las hojas de rábano

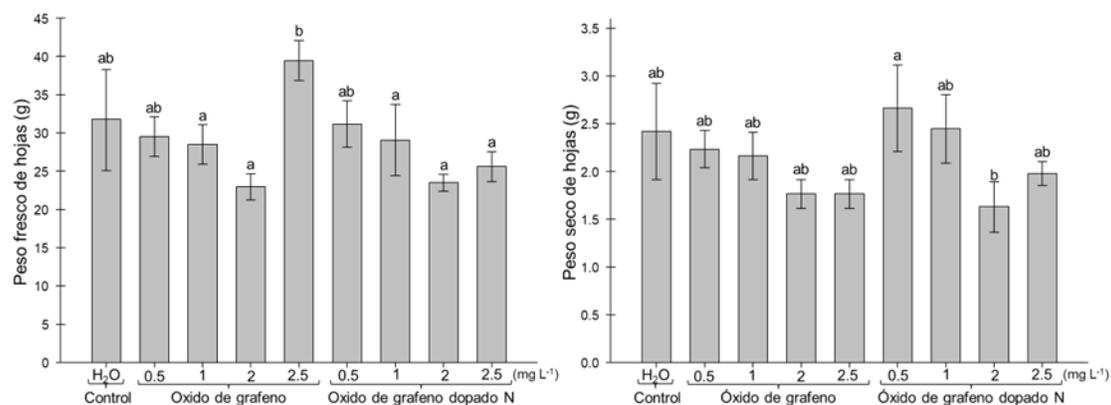


Figura 31. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el peso fresco y seco de las hojas de rábano.

En los resultados mostrados en la Fig. 31, se observa que el peso fresco y seco de hojas varió entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. Para el peso fresco de hojas, el control con agua presentó un valor promedio de ≈ 30 g, sin diferencias significativas con la mayoría de los tratamientos. Sin embargo, 2.5 mg L^{-1} de OG presentó el mayor valor registrado (≈ 40 g, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control y a otros tratamientos con OG. En contraste, 2 mg L^{-1} de OG mostró el menor peso fresco de hojas (≈ 22 g, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control. Los tratamientos con OGN no mostraron diferencias significativas entre sí ni con el control, con valores promedio entre 27 y 32 g.

Para el peso seco de hojas, el control presentó un valor promedio de ≈ 2.4 g, sin diferencias significativas con la mayoría de los tratamientos. 0.5 mg L^{-1} de OGN mostró el mayor valor registrado (≈ 2.8 g, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control. En contraste, 2 mg L^{-1} de OGN presentó el menor peso seco de hojas (≈ 1.4 g, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a otros tratamientos.

7.4.8 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el índice de clorofila de las hojas de rábano

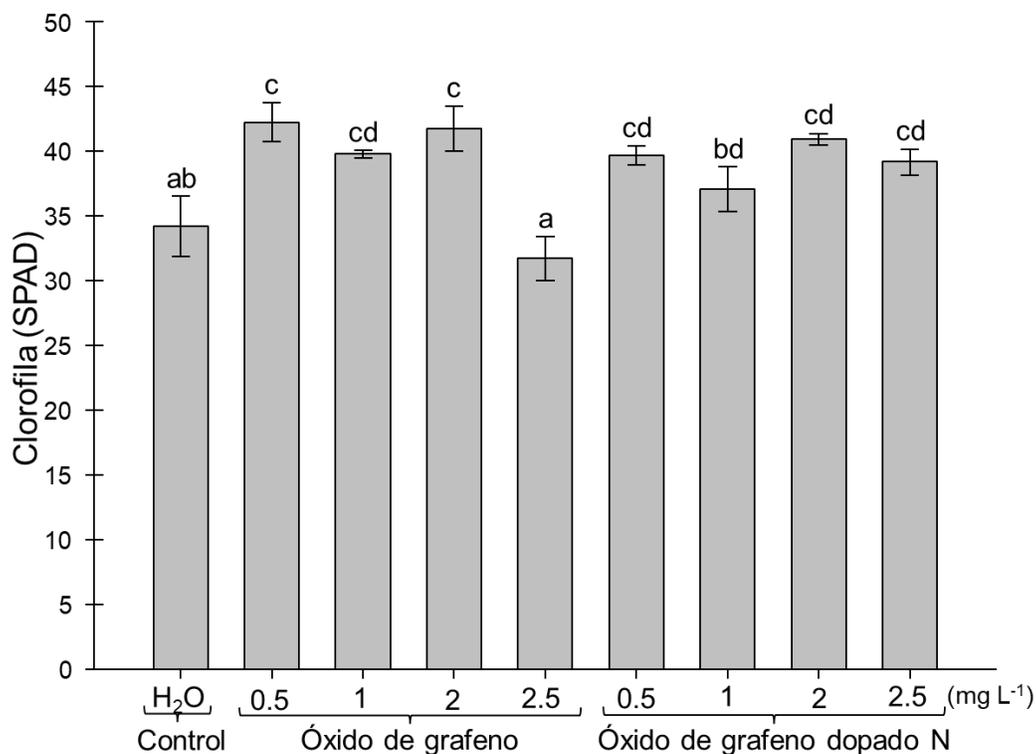


Figura 32. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el índice de clorofila las hojas de rábano.

En los resultados mostrados en la Fig. 32, se observa que la concentración de clorofila varió significativamente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de ≈ 35 SPAD, sin diferencias significativas con 0.5 mg L^{-1} de OG y 1 mg L^{-1} de OGN.

En los tratamientos con OG, 1 y 2 mg L^{-1} mostraron un aumento significativo en la concentración de clorofila en comparación con el control ($\approx 42\text{--}44$ SPAD, $p < 0.05$). Sin embargo, 2.5 mg L^{-1} de OG presentó la menor concentración de clorofila registrada (≈ 31 SPAD, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a los demás tratamientos.

En los tratamientos con OGN, todas las concentraciones mostraron valores similares o superiores al control. 0.5, 2 y 2.5 mg L⁻¹ de OGN presentaron valores significativamente mayores que el control ($\approx 41\text{--}43$ SPAD, $p < 0.05$), mientras que 1 mg L⁻¹ de OGN mostró un valor intermedio (≈ 38 SPAD), sin diferencias con algunos tratamientos de OG.

7.4.9 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la tasa de fotosíntesis neta

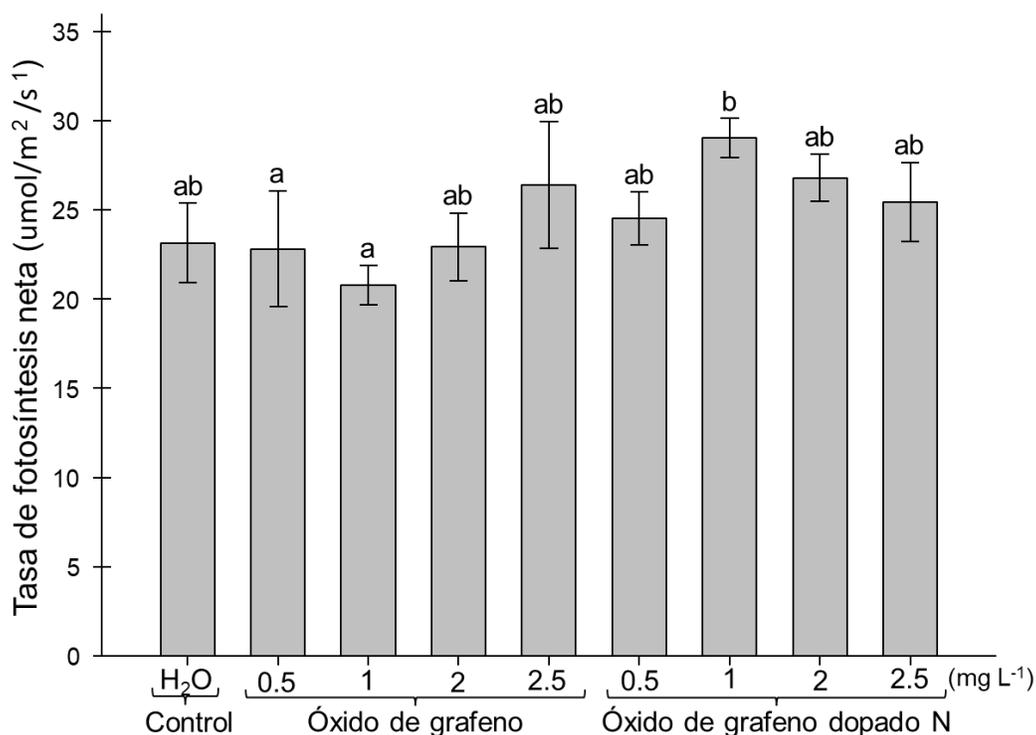


Figura 33. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la tasa de fotosíntesis neta.

En los resultados mostrados en la Fig. 33, se observa que la tasa de transpiración varió significativamente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de ≈ 4.2 mmol/m²/s, sin diferencias significativas con 0.5 mg L⁻¹ y 2.5 mg L⁻¹ de OGN.

En los tratamientos con OG, 1 y 2 mg L⁻¹ mostraron un aumento significativo en la tasa de transpiración en comparación con el control ($\approx 5.2\text{--}5.3$ mmol/m²/s, $p < 0.05$). 2.5 mg L⁻¹ de OG

presentó un valor intermedio (≈ 4.8 mmol/m²/s), sin diferencias con algunas concentraciones de OGN.

En los tratamientos con OGN, 0.5 mg L⁻¹ presentó la mayor tasa de transpiración registrada (≈ 6.2 mmol/m²/s, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control y a la mayoría de los tratamientos. En contraste, 2 mg L⁻¹ de OGN mostró la menor tasa de transpiración (≈ 3.5 mmol/m²/s, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a otros tratamientos.

7.4.10 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la tasa de transpiración

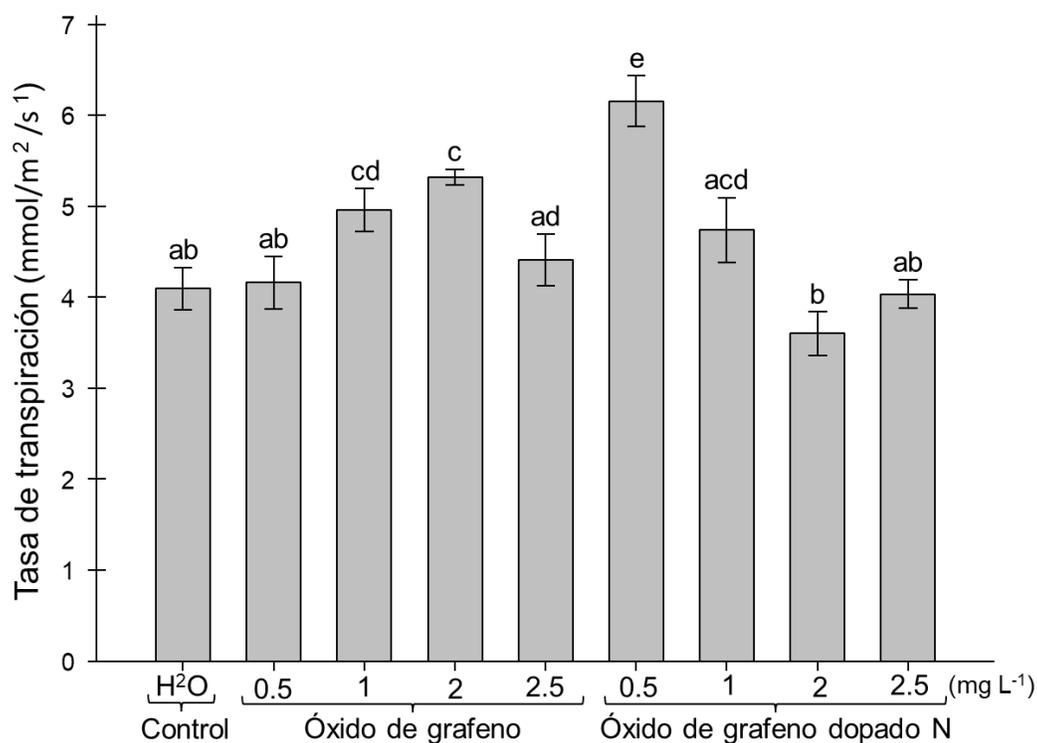


Figura 34. Efecto del Óxido de Grafeno y Óxido de Grafeno Dopado con Nitrógeno en la tasa de transpiración.

En los resultados mostrados en la Fig. 34, se observa que la tasa de transpiración varió significativamente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua

presentó un valor promedio de $\approx 4.3 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$, sin diferencias significativas con 0.5 mg L^{-1} y 2.5 mg L^{-1} de OG, así como con 2.5 mg L^{-1} de OGN.

En los tratamientos con OG, 1 mg L^{-1} mostró un aumento significativo en la tasa de transpiración en comparación con el control ($\approx 5.2 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$, $p < 0.05$), mientras que 2 mg L^{-1} presentó un valor intermedio ($\approx 4.5 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$).

En los tratamientos con OGN, 0.5 mg L^{-1} presentó la mayor tasa de transpiración registrada ($\approx 6.3 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control y a la mayoría de los tratamientos. En contraste, 2 mg L^{-1} de OGN mostró la menor tasa de transpiración ($\approx 3.2 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a otros tratamientos.

7.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico y de espectrofotometría de absorción atómica en el rábano

7.5.1 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de carbohidratos en rábano

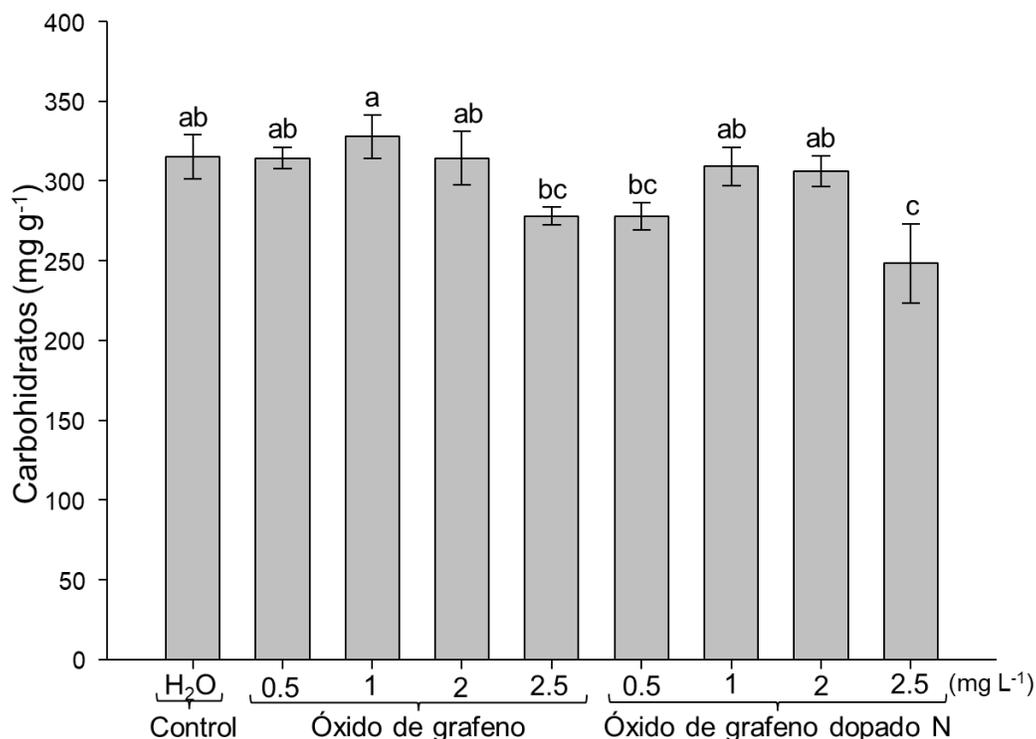


Figura 35. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de carbohidratos en rábano.

En los resultados mostrados en la Fig. 35, se observa que la concentración de carbohidratos varió ligeramente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de $\approx 310 \text{ mg g}^{-1}$, sin diferencias significativas con la mayoría de los tratamientos.

En los tratamientos con OG, 1 mg L^{-1} mostró el mayor valor de carbohidratos ($\approx 330 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), aunque sin diferencias significativas con el control ni con otros tratamientos de OG. En contraste, 2.5 mg L^{-1} de OG presentó una reducción significativa en la concentración de

carbohidratos ($\approx 280 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), siendo menor que el control y algunos tratamientos con OGN.

En los tratamientos con OGN, 2.5 mg L^{-1} presentó la menor concentración de carbohidratos ($\approx 250 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a los demás tratamientos con OGN y OG. El resto de las concentraciones de OGN no mostraron diferencias significativas con el control.

7.5.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de proteínas totales en rábano

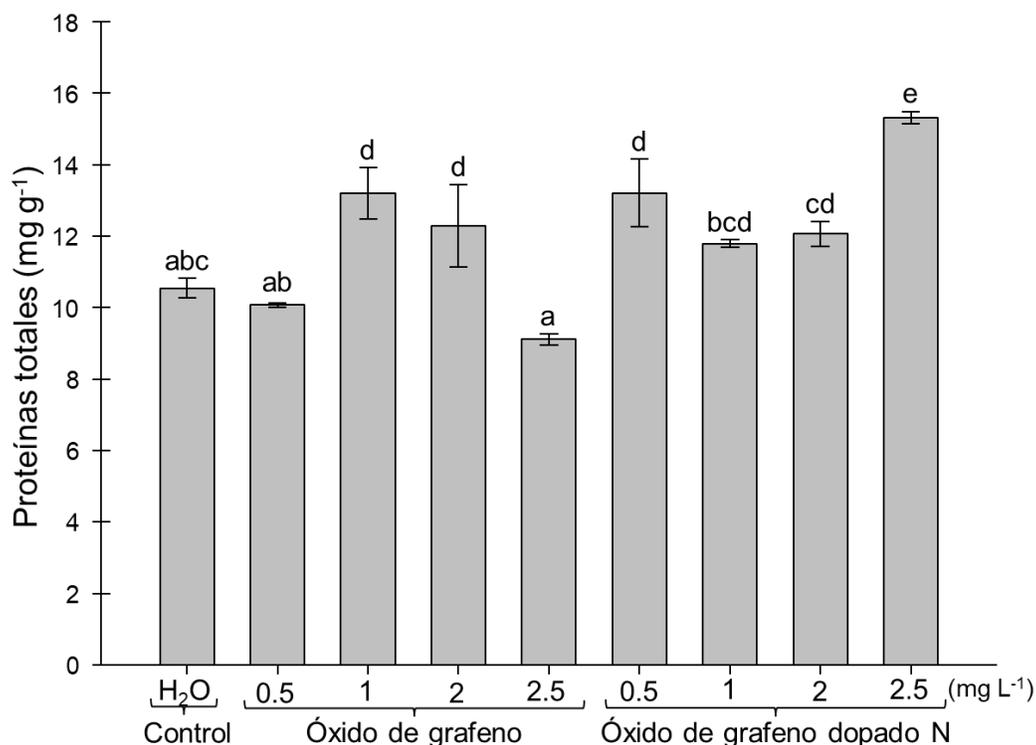


Figura 36. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de proteínas totales en rábano.

En los resultados mostrados en la Fig. 36, se observa que la concentración de proteínas totales varió significativamente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de $\approx 10.5 \text{ mg g}^{-1}$, sin diferencias significativas con 0.5 mg L^{-1} de OG y algunas concentraciones de OGN.

En los tratamientos con OG, 1 y 2 mg L⁻¹ mostraron un aumento significativo en la concentración de proteínas en comparación con el control ($\approx 13\text{--}14$ mg g⁻¹, $p < 0.05$). En contraste, 2.5 mg L⁻¹ de OG presentó la menor concentración registrada (≈ 8.5 mg g⁻¹, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a la mayoría de los tratamientos.

En los tratamientos con OGN, 2.5 mg L⁻¹ presentó la mayor concentración de proteínas (≈ 16.5 mg g⁻¹, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control y a todos los tratamientos con OG. 0.5, 1 y 2 mg L⁻¹ de OGN presentaron valores intermedios ($\approx 11\text{--}12$ mg g⁻¹), sin diferencias significativas con algunas concentraciones de OG.

7.5.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de lípidos totales en rábano

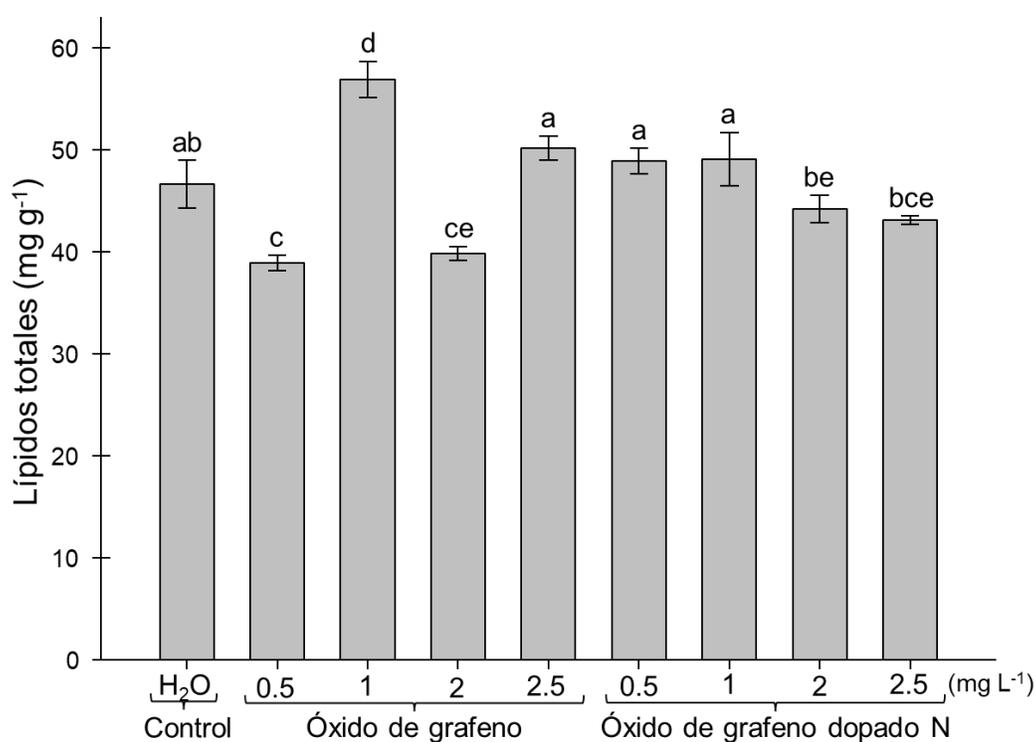


Figura 37. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de lípidos totales en rábano.

En los resultados mostrados en la Fig. 37, se observa que la concentración de lípidos totales varió significativamente entre los tratamientos y las concentraciones aplicadas. El control con agua presentó un valor promedio de $\approx 48 \text{ mg g}^{-1}$, sin diferencias significativas con 2.5 mg L^{-1} de OG, así como con 1 y 2 mg L^{-1} de OGN.

En los tratamientos con OG, 1 mg L^{-1} mostró la mayor concentración de lípidos ($\approx 58 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), siendo significativamente superior al control y a la mayoría de los tratamientos. En contraste, 0.5 mg L^{-1} de OG presentó la menor concentración registrada ($\approx 40 \text{ mg g}^{-1}$, $p < 0.05$), siendo significativamente inferior al control y a los tratamientos con OGN.

En los tratamientos con OGN, 1 y 2 mg L^{-1} presentaron valores similares al control ($\approx 50 \text{ mg g}^{-1}$), sin diferencias significativas. En contraste, 2.5 mg L^{-1} de OGN mostró un valor ligeramente menor ($\approx 45 \text{ mg g}^{-1}$), aunque sin diferencias significativas con algunas concentraciones de OG.

7.5.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de potasio en rábano

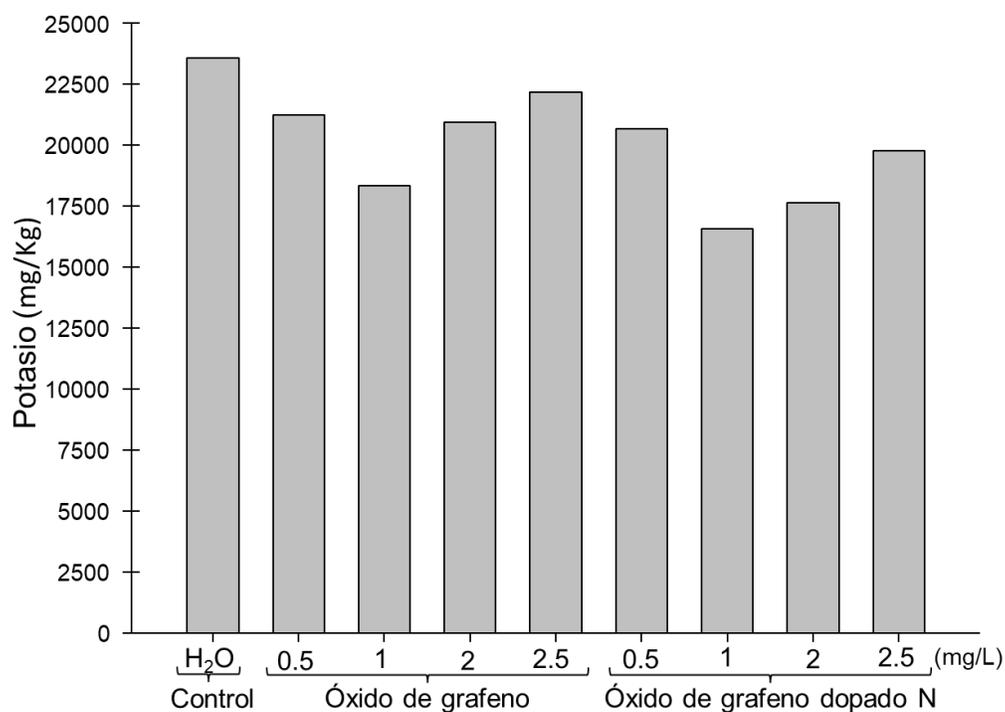


Figura 38. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de potasio en rábano.

Los resultados (Fig. 38) indican que, el tratamiento con agua (H_2O) presentó la mayor cantidad de potasio en las plantas de rábano, alcanzando $23562.34 \text{ mg kg}^{-1}$, lo que demuestra que este control supera significativamente a todos los tratamientos con óxido de grafeno (OG) y óxido de grafeno dopado con nitrógeno (OGN) en términos de contenido de potasio. En comparación, las concentraciones de OG y OGN, incluso en su mayor dosis de 2.5 mg L^{-1} , no lograron igualar ni superar el valor del control, mostrando una reducción en los niveles de potasio en las plantas.

En particular, el tratamiento con OG a 1 mg L^{-1} y OGN a 1 mg L^{-1} resultaron en los valores de potasio más bajos, con $18334.83 \text{ mg kg}^{-1}$ y $16566.90 \text{ mg kg}^{-1}$ respectivamente, evidenciando que estas concentraciones pueden tener un impacto negativo significativo en la absorción de potasio.

7.5.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno la cantidad de calcio en rábano

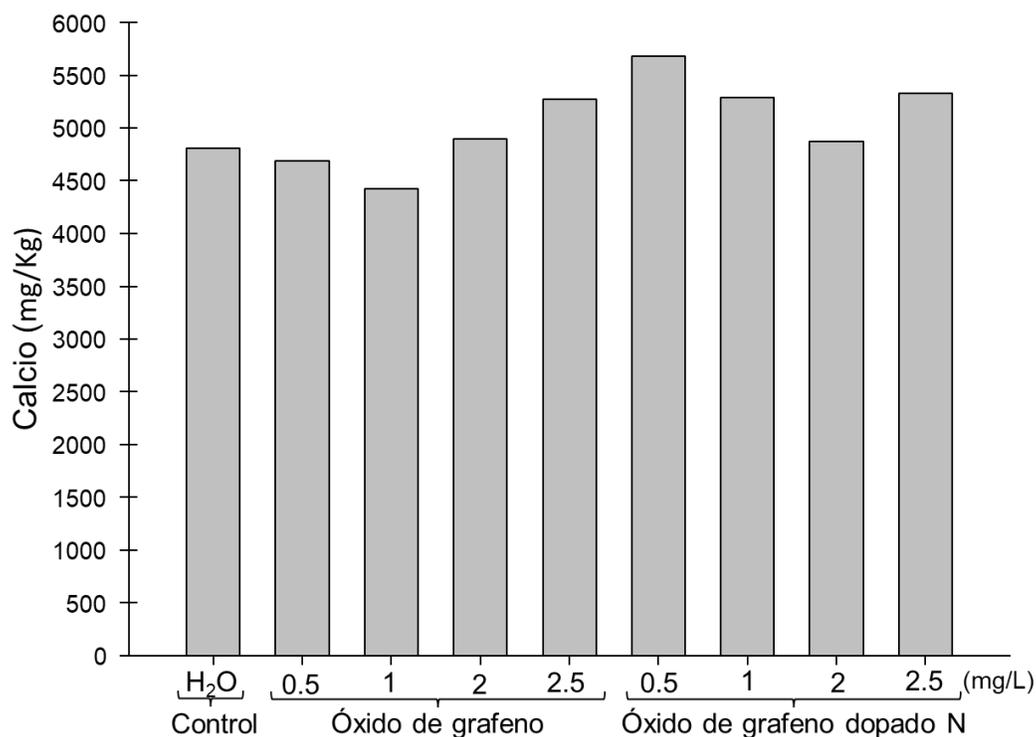


Figura 39. Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la cantidad de calcio en rábano.

Los resultados (Fig. 39) indican que, además de las concentraciones de OGN a 0.5 mg L^{-1} y 1 mg L^{-1} que superaron el control, la aplicación de OGN a 2 mg L^{-1} resultó en un valor de $4873.74 \text{ mg kg}^{-1}$, ligeramente superior al control de agua ($4808.59 \text{ mg kg}^{-1}$), sugiriendo un efecto positivo moderado. Por otro lado, OGN a 2.5 mg L^{-1} presentó un incremento adicional, alcanzando $5327.18 \text{ mg kg}^{-1}$, nuevamente por encima del control, aunque no tan alto como las concentraciones más bajas de OGN.

En el caso de las concentraciones de óxido de grafeno (OG), a 0.5 mg L^{-1} , el contenido de calcio fue de $4690.81 \text{ mg kg}^{-1}$, ligeramente por debajo del control. A 2 mg L^{-1} , el nivel de calcio aumentó a $4893.86 \text{ mg kg}^{-1}$, superando marginalmente al control, mientras que la concentración más alta de 2.5 mg L^{-1} resultó en $5273.64 \text{ mg kg}^{-1}$, lo cual es superior al valor del control, pero aún inferior a las concentraciones equivalentes de OGN. Estos resultados sugieren que, aunque las concentraciones más altas de OG y OGN tienen un efecto positivo sobre la absorción de calcio, las dosis bajas de OGN (0.5 y 1 mg L^{-1}) son las que muestran un efecto más pronunciado y beneficioso.

8. DISCUSIÓN

8.1 Caracterización de óxido de grafeno y sus modificaciones

Las imágenes SEM han revelado la estructura y distribución de las nanopartículas de NOG, confirmando una morfología homogénea con tamaños que van de 15.108 nm a 26.287 nm. Estos resultados coinciden con trabajos anteriores que muestran cómo el dopaje con nitrógeno introduce estructuras porosas y arrugadas en las hojas de grafeno, mejorando su reactividad y potencial en aplicaciones catalíticas (reactividad) (Long et al., 2010). Este patrón también se observa en estudios que destacan la utilidad de las nanopartículas dopadas en sistemas de sensores electroquímicos, donde las estructuras rugosas proporcionan una mayor área superficial, mejorando la sensibilidad y la capacidad de detección del material (Rao et al., 2017). Además, investigaciones más recientes han revelado que la incorporación de nitrógeno en la estructura del grafeno aumenta la capacidad de adsorción y las propiedades catalíticas, lo que confirma la consistencia de las características morfológicas y sus aplicaciones potenciales en el área agrícola y ambiental (Liang et al., 2015).

El análisis FTIR ha mostrado la disminución de grupos oxigenados como C=O y la aparición de enlaces C-N en las muestras de NOG. Esto coincide con los resultados de otros estudios que también observaron picos en la región correspondiente a los enlaces C=N tras el dopaje, lo cual confirma la efectividad del proceso y método de dopaje (Farzaneh et al., 2016). Además, se ha reportado que la intensidad de estos picos está relacionada directamente con la cantidad de nitrógeno incorporado, apoyando los resultados obtenidos en este estudio (Farzaneh et al., 2016). Se ha demostrado que, diferentes configuraciones de nitrógeno, como las piridínicas y las grafíticas, contribuyen de manera diversa a las propiedades ópticas y catalíticas del material (Geng et al., 2011), lo que coincide con los resultados obtenidos en este análisis.

El espectro UV-Vis muestra un pico de absorbancia en 255 nm, lo cual es indicativo de las transiciones electrónicas asociadas con los enlaces C=N en el grafeno dopado. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que identifican picos específicos tras el dopaje, reflejando cambios en las propiedades electrónicas del material (Khai et al., 2012). No obstante, otro estudio

encontró variaciones en la longitud de onda de absorción al cambiar la concentración de nitrógeno, lo que resalta la influencia del contenido de dopante en las propiedades ópticas del material (Pei et al., 2013). Por su parte, Sandoval et al. (2016) sugirieron que, al ajustar la cantidad y configuración del nitrógeno, se obtienen materiales con propiedades ópticas específicas para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos, lo cual amplía las posibles aplicaciones del material.

Los picos observados en los análisis XRD de las muestras de NOG muestran una reducción en el espaciado entre capas, lo que sugiere una reordenación estructural significativa debida a la incorporación de pequeñas cantidades de nitrógeno. Estos resultados confirman trabajos anteriores que demostraron una relación directa entre la incorporación de nitrógeno y la modificación de la estructura cristalina del grafeno (Kim et al., 2021). Contrastando estos hallazgos, un estudio adicional indicó que, aunque el dopaje mejora ciertas propiedades, el exceso de nitrógeno puede llevar a una desorganización estructural, lo que se refleja en un patrón de difracción más difuso (Khai et al., 2012). Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar las condiciones de dopaje, ya que la cantidad de nitrógeno y la forma en que se integra en la red del grafeno influyen directamente en la estabilidad estructural y funcional del material.

El análisis XPS permitió confirmar la pureza del óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NOG), evidenciada por una alta composición de carbono (83.4%) y una mínima presencia de impurezas, como sodio (0.12%). Además, el porcentaje de nitrógeno incorporado alcanzó un 3.82%, indicando un dopaje efectivo. Los datos obtenidos también revelan la presencia de nitrógeno en configuraciones piridínicas y grafíticas, lo que valida la incorporación estructural en el material.

8.2 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en la germinación de rábano

8.2.1 Comparación de velocidad y porcentaje de germinación

Los datos muestran que las concentraciones bajas (0.5 y 1 mg L⁻¹) de OGN mejoraron significativamente la germinación, lo que sugiere que este material actúa como un estimulante fisiológico. Un estudio previo realizado por Wang et al. (2023) en semillas de maíz reportó efectos

similares, donde el OGN aumentó la tasa de absorción de agua y estimuló la actividad enzimática asociada a la germinación, favoreciendo un establecimiento más rápido de las plántulas.

Estos efectos beneficiosos pueden explicarse por la influencia del dopaje con nitrógeno, que introduce grupos funcionales adicionales en la estructura del grafeno, aumentando su capacidad de retención de agua y promoviendo una mejor interacción con las membranas celulares (Duan et al., 2015; Xia et al., 2020). Kim et al. (2020) señalaron que la modificación química del grafeno puede optimizar la transferencia de electrones en procesos bioquímicos clave, facilitando la activación de enzimas relacionadas con la germinación.

Por el contrario, las concentraciones elevadas de OG (2.5 mg L^{-1}) redujeron significativamente la germinación y la elongación radicular, lo que indica un impacto negativo en la viabilidad de las semillas. Estos resultados coinciden con estudios previos en lechuga y trigo, donde se reportó que el OG en altas concentraciones indujo estrés oxidativo, alterando la integridad de las membranas celulares y limitando la absorción de agua (Lee et al., 2021; Du et al., 2016).

El mecanismo por el cual el OG afecta negativamente la germinación puede estar relacionado con su capacidad para adsorber nutrientes y agua, reduciendo su disponibilidad para las semillas (Waychunas et al., 2005). Adicionalmente, Hu et al. (2014) y Prasad et al. (2017) encontraron que altas concentraciones de nanomateriales de carbono pueden inducir acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), causando daño oxidativo en las células vegetales y afectando procesos metabólicos esenciales.

Los índices de velocidad de germinación (IVG y GSI) y la tasa media de germinación (MGR) obtenidos en este estudio refuerzan esta tendencia. Mientras que el control presentó valores óptimos, el OG a 2.5 mg L^{-1} mostró una reducción drástica en estos indicadores, reflejando un impacto negativo en la germinación. En contraste, OGN en concentraciones de 0.5 y 1 mg L^{-1} mejoró estos parámetros, lo que sugiere que el dopaje con nitrógeno puede optimizar la sincronización y eficiencia germinativa en ciertas especies.

8.2.2 Moderación del efecto negativo del OG mediante el dopaje con nitrógeno

Los resultados sugieren que la incorporación de nitrógeno en la estructura del óxido de grafeno mitiga los efectos negativos observados con el OG. La presencia de nitrógeno favorece la estabilidad química del material y su interacción con las macromoléculas vegetales, reduciendo la generación de estrés oxidativo y mejorando la compatibilidad con los sistemas biológicos. Este hallazgo es consistente con estudios previos que han reportado que el dopaje con nitrógeno en materiales de carbono mejora la estabilidad estructural y minimiza la acumulación de compuestos reactivos perjudiciales para el desarrollo vegetal (Hu et al., 2014; Prasad et al., 2017).

El análisis bioquímico demostró que el OGN permite mantener niveles adecuados de metabolitos clave en comparación con el OG. Se observó que en concentraciones bajas a moderadas, el OGN favoreció la actividad enzimática relacionada con la germinación, mientras que el OG en concentraciones elevadas provocó una reducción en la viabilidad de las semillas, lo cual concuerda con estudios previos en otras especies vegetales.

8.2.3 Influencia en el crecimiento radicular y otras características morfométricas

El análisis del crecimiento radicular mostró que el OGN favoreció la elongación de la raíz en concentraciones moderadas (1 y 2 mg L), mientras que el OG a 2.5 mg L redujo drásticamente la longitud y área de la raíz. Este efecto negativo ha sido documentado previamente en cultivos como la lechuga y el trigo, donde concentraciones elevadas de OG alteraron la morfología radicular y afectaron la viabilidad de las semillas (Waychunas et al., 2005).

Además, la mayor estabilidad química del OGN podría favorecer su interacción con macromoléculas esenciales en el metabolismo germinativo, evitando perturbaciones en la estructura celular y promoviendo un desarrollo radicular más homogéneo. Esta hipótesis se alinea con hallazgos previos en otras especies vegetales, donde materiales de carbono dopados con nitrógeno han mostrado una mejor integración en sistemas biológicos sin comprometer procesos metabólicos esenciales (Kim et al., 2020).

8.3 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico al cuarto día de germinación de rábano

8.3.1 Carbohidratos totales

Los resultados obtenidos muestran que el contenido de carbohidratos totales en las plántulas de rábano fue afectado diferencialmente por los tratamientos con óxido de grafeno (OG) y óxido de grafeno dopado con nitrógeno (OGN). A concentraciones bajas y moderadas (0.5, 1 y 2 mg L), el OGN no mostró diferencias significativas respecto al control, lo que sugiere que este material no interfiere con la síntesis o almacenamiento de carbohidratos en esta fase del desarrollo. En contraste, el OG a 2.5 mg L provocó una reducción significativa en la cantidad de carbohidratos, lo que podría estar relacionado con el estrés oxidativo y una alteración en la eficiencia fotosintética, como ha sido reportado en estudios previos en otros cultivos (Wang et al., 2023).

8.3.2 Proteínas totales

El análisis de proteínas totales reveló que el OGN en concentraciones de 1 y 2 mg L promovió un ligero incremento en los niveles de proteínas en comparación con el control, lo que podría estar asociado a un estímulo en la expresión de enzimas antioxidantes y proteínas estructurales. Este comportamiento ha sido observado en estudios previos con otros materiales de carbono dopados, donde se reportó una mejora en la estabilidad proteica y una mayor síntesis de proteínas en respuesta al dopaje con nitrógeno (Duan et al., 2015; Xia et al., 2020). Sin embargo, el OG en concentraciones altas (2.5 mg L) disminuyó significativamente el contenido de proteínas, lo que podría deberse a un efecto de degradación proteica inducida por el estrés oxidativo, como lo mencionan Kim et al. (2020) en cultivos de trigo.

8.3.3 Lípidos totales

En cuanto al contenido de lípidos, los tratamientos con OGN a 1 y 2 mg L no mostraron diferencias significativas con el control, lo que sugiere que el dopaje con nitrógeno evita alteraciones en la biosíntesis de lípidos esenciales para la integridad de las membranas celulares. En cambio, las plántulas tratadas con OG a concentraciones elevadas (2.5 mg L) presentaron una reducción considerable en el contenido de lípidos totales, lo que podría estar vinculado con el daño

estructural en las membranas celulares debido al estrés oxidativo inducido por este material, similar a lo reportado por Lee et al. (2021) y Du et al. (2016) en estudios previos en otros cultivos.

8.4 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en las variables fisiológicas y morfométricas

8.4.1 Efecto en la altura de la planta

Si bien no se observaron diferencias significativas en la altura de las plantas entre los tratamientos con OG, OGN y el control, la tendencia sugiere que concentraciones más altas de OG pueden favorecer un crecimiento diferencial. Esto podría estar relacionado con una redistribución de los recursos energéticos en respuesta a la presencia del material, como se ha documentado en estudios previos (Wang et al., 2023).

8.4.2 Efecto en el número de hojas

El número de hojas mostró variaciones entre los tratamientos, destacando que el OG a 1 mg L^{-1} favoreció un ligero incremento sin ser estadísticamente significativo, mientras que la concentración de 2 mg L^{-1} redujo esta variable de forma considerable. Esto sugiere que la presencia de OG en ciertas dosis podría inducir efectos negativos en el desarrollo foliar, posiblemente debido a alteraciones en la absorción de agua y nutrientes (Lee et al., 2021; Du et al., 2016).

8.4.3 Efecto en el área foliar

Se identificaron cambios en la expansión foliar, con una disminución evidente en tratamientos con OG a 2 mg L^{-1} y un aumento con 2.5 mg L^{-1} , lo que resalta la respuesta diferenciada de la planta dependiendo de la concentración utilizada. En contraste, el OGN mantuvo valores similares al control, lo que sugiere que el dopaje con nitrógeno podría contribuir a la estabilidad del crecimiento foliar ante la exposición a estos materiales (Kim et al., 2020).

8.4.4 Efecto en el diámetro y longitud del bulbo

El diámetro del bulbo no presentó diferencias significativas, aunque la longitud mostró un aumento con OG a 2.5 mg L^{-1} . Este resultado podría indicar que en ciertas concentraciones, el OG estimula un crecimiento vertical del bulbo en lugar de un desarrollo uniforme en grosor, posiblemente como una estrategia de adaptación al estrés inducido (Hu et al., 2014; Prasad et al., 2017).

8.4.5 Efecto en el peso fresco y seco de las hojas y del bulbo

El OG a 2.5 mg L^{-1} promovió un aumento en el peso fresco de las hojas, pero a 2 mg L^{-1} redujo significativamente este parámetro. En cambio, el OGN mostró valores más estables en comparación con el control, lo que sugiere que el dopaje con nitrógeno podría mitigar el impacto negativo en la acumulación de biomasa. Estos hallazgos coinciden con estudios donde materiales de carbono dopados han demostrado mayor compatibilidad con sistemas biológicos (Waychunas et al., 2005).

8.4.6 Efecto en el índice de clorofila

El OG en altas concentraciones redujo significativamente la concentración de clorofila, lo que sugiere un posible deterioro en la eficiencia fotosintética. Sin embargo, en dosis intermedias, se observó un aumento en los niveles de clorofila en comparación con el control. Por otro lado, el OGN mostró una menor variabilidad en esta variable, lo que indica que la modificación con nitrógeno podría reducir el impacto sobre la capacidad fotosintética (Xia et al., 2020).

8.4.7 Efecto en la tasa de fotosíntesis neta

Se evidenció una reducción significativa en la tasa de fotosíntesis neta en las plantas tratadas con OG a 2.5 mg L^{-1} , lo que sugiere una alteración en los procesos metabólicos asociados a la captura de energía lumínica. En contraste, los tratamientos con OGN mantuvieron valores cercanos al

control, reforzando la idea de que el dopaje con nitrógeno puede minimizar el impacto negativo del OG en la fisiología de la planta (Duan et al., 2015).

8.4.8 Efecto en la tasa de transpiración

Los tratamientos con OG a 1 y 2 mg L⁻¹ aumentaron significativamente la tasa de transpiración en comparación con el control, lo que sugiere un posible efecto sobre la apertura estomática y el transporte de agua en la planta. Por otro lado, el OGN a 0.5 mg L⁻¹ registró la mayor tasa de transpiración, lo que podría estar relacionado con una mejora en la conductancia estomática. En contraste, el OGN a 2 mg L⁻¹ presentó la menor tasa de transpiración, lo que indica que en concentraciones elevadas este material podría inducir un cierre estomático como mecanismo de defensa ante el estrés (Zhang et al., 2019; Lira-Saldivar et al.)

8.5 Efecto del óxido de grafeno y óxido de grafeno dopado con nitrógeno en el análisis bioquímico y de espectrofotometría de absorción atómica en el rábano

8.5.1 Efecto en la cantidad de carbohidratos totales

Los resultados indicaron que no hubo diferencias significativas en el contenido de carbohidratos entre el control y la mayoría de los tratamientos con OG y OGN. Sin embargo, OG a 2.5 mg L⁻¹ mostró una reducción significativa en la concentración de carbohidratos, lo que sugiere una posible alteración en el metabolismo energético de la planta bajo esta concentración. En contraste, OGN a 2.5 mg L⁻¹ también presentó una reducción en los carbohidratos, lo que podría estar asociado a un mayor consumo metabólico en respuesta al dopaje con nitrógeno. Esto concuerda con estudios previos que indican que materiales dopados pueden influir en la eficiencia de asimilación y almacenamiento de carbohidratos en plantas expuestas a nanomateriales (Lira-Saldivar et al., 2023).

8.5.2 Efecto en la cantidad de proteínas totales

El OG y el OGN indujeron incrementos significativos en los niveles de proteínas en algunas concentraciones específicas. En particular, OG a 1 y 2 mg L⁻¹ y OGN a 0.5 y 2.5 mg L⁻¹ mostraron

los valores más elevados en comparación con el control. Esto sugiere que la presencia de estos materiales podría inducir una respuesta en la síntesis de proteínas, posiblemente como un mecanismo de adaptación al estrés. El OGN, además, podría mejorar la disponibilidad de nitrógeno, lo que favorecería la síntesis de proteínas estructurales y enzimáticas (Zhao et al., 2022).

8.5.3 Efecto en la cantidad de lípidos totales

El análisis de lípidos mostró que OG a 1 mg L^{-1} presentó el mayor contenido de lípidos, mientras que OGN en concentraciones elevadas (2.5 mg L^{-1}) mostró una reducción en esta variable. Esto podría indicar que, en concentraciones moderadas, el OG puede favorecer la síntesis de lípidos, mientras que, a niveles elevados, el OGN podría alterar la estabilidad de las membranas celulares, posiblemente debido a un ajuste en la composición lipídica como respuesta al estrés oxidativo (Lira-Saldivar et al., 2023).

8.5.4 Efecto en la cantidad de potasio

El contenido de potasio en las plantas tratadas con OG y OGN mostró variaciones significativas. En general, los niveles de potasio fueron menores en las plantas expuestas a OG, particularmente a 1 mg L^{-1} y 2 mg L^{-1} , lo que sugiere que la presencia de este material podría estar interfiriendo con la absorción de este elemento. En contraste, el OGN mostró una tendencia a mantener niveles más estables de potasio, indicando que el dopaje con nitrógeno podría contribuir a una mejor homeostasis iónica en la planta (Zhao et al., 2022).

8.5.5 Efecto en la cantidad de calcio

Los niveles de calcio también variaron según el tratamiento. Se observó que OGN a 0.5 y 1 mg L^{-1} aumentó significativamente el contenido de calcio en comparación con el control, mientras que OG a 2 mg L^{-1} y OGN a 2.5 mg L^{-1} también presentaron incrementos. Esto sugiere que el dopaje con nitrógeno podría mejorar la absorción de calcio a bajas concentraciones, aunque en dosis más altas podría afectar la disponibilidad del elemento, posiblemente debido a interacciones con otros cationes esenciales (Lira-Saldivar et al., 2023).

9. CONCLUSIONES

Con base en los hallazgos obtenidos, se pudo determinar que estos nanomateriales presentan un impacto diferenciado en función de la concentración y el tipo de dopaje, influyendo en distintos parámetros morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de la planta.

En relación con el objetivo general, se confirmó que el OG y el OGN modifican diversos procesos fisiológicos en las plantas de rábano. Se observó que a concentraciones bajas (0.5 y 1 mg L^{-1}), ambos materiales pueden estimular la germinación y el desarrollo inicial de las plántulas, favoreciendo la acumulación de biomasa y aumentando la eficiencia fotosintética. No obstante, en concentraciones elevadas (2 y 2.5 mg L^{-1}), el OG afectó negativamente el crecimiento de las plantas, reduciendo la fotosíntesis y afectando la estabilidad de las membranas celulares, lo que sugiere la presencia de un estrés oxidativo. En contraste, el OGN mostró un efecto más moderado en altas concentraciones, lo que indica que el dopaje con nitrógeno puede desempeñar un papel protector, minimizando los efectos adversos del OG en el metabolismo de la planta.

Respecto a los objetivos particulares, se logró estandarizar un protocolo eficiente para el dopaje con nitrógeno del óxido de grafeno, obteniendo un material estable y funcional con potencial aplicación en la agricultura. La caracterización fisicoquímica permitió identificar diferencias estructurales entre el OG y el OGN, confirmando que la incorporación de nitrógeno genera cambios en la superficie del material que pueden influir en su interacción con los sistemas biológicos.

En cuanto a la evaluación del efecto del OG y OGN en la germinación, se encontró que las concentraciones bajas pueden mejorar la velocidad y porcentaje de germinación, mientras que dosis elevadas afectan negativamente la absorción de nutrientes esenciales como el calcio y potasio. Este fenómeno sugiere que la interacción de los nanomateriales con la superficie de las semillas puede modificar la permeabilidad de las membranas y alterar el balance iónico en la fase inicial del desarrollo vegetal.

Durante el crecimiento de las plantas, se determinó que el OG en concentraciones elevadas induce estrés oxidativo, lo que se traduce en una reducción de la tasa de transpiración y de la fotosíntesis, afectando el metabolismo energético de la planta. Por otro lado, el OGN demostró un efecto más estable en la regulación de la transpiración y el metabolismo de carbohidratos y proteínas, lo que sugiere que el dopaje con nitrógeno permite una mejor homeostasis en la planta, reduciendo el impacto negativo del OG en condiciones de alta concentración.

El dopaje con nitrógeno se presenta como una estrategia prometedora para mitigar los efectos adversos del OG en cultivos agrícolas, favoreciendo su compatibilidad con los procesos fisiológicos de las plantas. No obstante, para determinar su viabilidad como insumo en la producción agrícola sostenible, es necesario realizar estudios a largo plazo que analicen su impacto en otros cultivos y en condiciones de campo. Asimismo, futuras investigaciones deben enfocarse en evaluar los mecanismos moleculares subyacentes que permitan comprender mejor la interacción de estos nanomateriales con los sistemas biológicos y sus posibles implicaciones en la fisiología vegetal.

10. LITERATURA CITADA

- Affrald, R.J. 2024. Large-scale production and application of graphene oxide nanoparticles to meet agriculture needs. *Current Applied Science and Technology*. doi: 10.55003/cast.2023.254564
- Aguirre-Becerra, H., Feregrino-Pérez, A., Esquivel, K., Pérez-García, C.E., Vázquez-Hernández, M. y Mariana-Alvarado, A. (2022). Nanomaterials as an alternative to increase plant resistance to abiotic stresses. *Frontiers in Plant Science*, 13, artículo 1023636. doi: 10.3389/fpls.2022.1023636
- Ahmad, N., Kausar, A. y Muhammad, B. (2016). An investigation on 4-aminobenzoic acid modified polyvinyl chloride/graphene oxide and PVC/graphene oxide based nanocomposite membranes. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 32(4): 419–448. doi: 10.1177/8756087915616434
- Akram, N.A., Noreen, S., Noreen, T. y Ashraf, M. (2015). Exogenous application of (*Raphanus sativus* L.) plants under water-deficit conditions. *Brazilian Journal of Botany*, 38(3): 431–439. doi: 10.1007/s40415-015-0149-7
- Ali, S., Al-Tohamy, R., Koutra, E., Moawad, M., Kornaros, M., Mustafa, A., Mahmoud, Y., Badr, A., Osman, M., Elsamahy, T., Jiao, H. y Sun, J. (2021). Nanobiotechnological advancements in agriculture and food industry: Applications, nanotoxicity, and future perspectives. *The Science of the Total Environment*, 792, artículo 148359. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148359
- Aydınlı, G. y Mennan, S. (2018). Biofumigation studies by using *Raphanus sativus* y *Eruca sativa* as winter cycle crops to control root-knot nematodes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 61. e180249. doi: 10.1590/1678-4324-2018180249
- Bâldea, I., Olteanu, D., Filip, G.A., Pogacean, F., Coroş, M., Suci, M., Tripon, S., Cenariu, M., Măgeruşan, L., Stefan-van Staden, R.I. y Pruneanu, S. (2020). Cytotoxicity mechanisms of nitrogen-doped graphene on human endothelial and colon cancer cells. *Carbon*, 158: 267–281. doi: 10.1016/j.carbon.2019.12.011
- Barickman, T.C. y Kopsell, D.A. (2016). Nitrogen form and ratio impact Swiss chard (*Beta vulgaris* subsp. *cicla*) shoot tissue carotenoid and chlorophyll concentrations. *Scientia Horticulturae*, 204: 99–105. doi: 10.1016/j.scienta.2016.04.007
- Bawa, R., Bawa, S., Maebius, S., Flynn, T. y Wei, C. (2005). Protecting new ideas and inventions in nanomedicine with patents. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 1(2): 150–158. doi: 10.1016/j.nano.2005.03.009
- Beevi, S.S., Mangamoori, L.N., Dhand, V. y Ramakrishna, D.S. (2009). Isothiocyanate profile and selective antibacterial activity of root, stem, and leaf extracts derived from *Raphanus sativus* L. *Foodborne Pathogens and Disease*, 6(1): 129–136. doi: 10.1089/fpd.2008.0166
- Castro-Torres, I.G., De la O-Arciniega, M., Gallegos-Estudillo, J., Naranjo-Rodríguez, E.B. y Domínguez-Ortiz, M.A. (2014). *Raphanus sativus* L. var. *niger* as a source of phytochemicals for the prevention of cholesterol gallstones. *Phytotherapy Research*, 28: 167–171. doi: 10.1002/ptr.4964
- Chen, H. y Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: New tools for sustainable development. *Trends in Food Science & Technology*, 22(11): 585–594. doi: 10.1016/j.tifs.2011.09.004

- Chen, J., Yang, L., Li, S. y Ding, W. (2018). Various physiological responses to graphene oxide and amine-functionalized graphene oxide in wheat (*Triticum aestivum*). *Molecules*, 23(5): 1104. doi: 10.3390/molecules23051104
- Chen, P., Xiao, T.-Y., Li, H., Yang, J., Wang, Z., Yao, H.-B. y Yu, S. (2012). Nitrogen-doped graphene/ZnSe nanocomposites: Hydrothermal synthesis and their enhanced electrochemical and photocatalytic activities. *ACS Nano*, 6(1): 712–719. doi: 10.1021/nn204191x
- Chen, Y., Ren, X., Li, Y., Liu, B., Wang, X., Tu, J., Guo, Z., Jin, G., Min, G. y Ci, L. (2020). Promotion effect of nitrogen-doped functional carbon nanodots on the early growth stage of plants. *Oxford Open Materials Science*, sin volumen ni paginación. doi: 10.1093/OXFMAT/ITAB002
- Cheng, F., Liu, Y., Lu, G., Zhang, X., Xie, L. y Xu, B. (2016). Graphene oxide modulates root growth of *Brassica napus* L. and regulates ABA and IAA concentration. *Journal of Plant Physiology*, 193: 57–63. doi: 10.1016/j.jplph.2016.02.011
- Chhipa, H. (2019). Applications of nanotechnology in agriculture. En: *Methods in Microbiology*, Vol. 46: 115–142. Academic Press. doi: 10.1016/bs.mim.2019.01.002
- Ciesielski, A. y Samorì, P. (2014). Graphene via sonication assisted liquid-phase exfoliation. *Chemical Society Reviews*, 43(1): 381–398. doi: 10.1039/C3CS60217F
- Coraspe-León, H.M., Muraoka, T., Franzini, V.I., Contreras Espinal, F.S. y Trivelin, P.C.O. (2009). Absorción de formas de nitrógeno amoniacal y nítrica por plantas de papa en la producción de tubérculo-semilla. *Agronomía Tropical*, 59(1): 45–58. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0002-192X2009000100005&script=sci_arttext
- Ditta, A. (2012). How helpful is nanotechnology in agriculture? *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 3(3), artículo 033002. doi: 10.1088/2043-6262/3/3/033002
- Du, S., Zhang, P., Zhang, R., Lu, Q., Liu, L., Bao, X. y Liu, H. (2016). Reduced graphene oxide induces cytotoxicity and inhibits photosynthetic performance of the green alga *Scenedesmus obliquus*. *Chemosphere*, 164: 499–507. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.138
- Duan, X., Ao, Z., Sun, H., Indrawirawan, S., Wang, Y., Kang, J., Liang, F., Zhu, Z.H. y Wang, S. (2015a). Nitrogen-doped graphene for generation and evolution of reactive radicals by metal-free catalysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(7): 4169–4178. doi: 10.1021/am508416n
- Duan, X., O'Donnell, K., Sun, H., Wang, Y. y Wang, S. (2015b). Sulfur and nitrogen co-doped graphene for metal-free catalytic oxidation reactions. *Small*, 11(25): 3036–3044. doi: 10.1002/sml.201403715
- Duan, Y., Xu, M., Gao, S., Liu, H., Huang, S. y Wang, B. (2016). Long-term incorporation of manure with chemical fertilizers reduced total nitrogen loss in rain-fed cropping systems. *Scientific Reports*, 6(1), artículo 33611. doi: 10.1038/srep33611
- Engelbrecht, G.M., Ceronio, G.M. y Motseki, P.C. (2010). Effect of nitrogen levels and sources on production of Swiss chard (*Beta vulgaris* var. *cicla*). *South African Journal of Plant and Soil*, 27(3): 229–234. doi: 10.1080/02571862.2010.10639991
- Fabiyi, O.A., Alabi, R.O. y Ansari, R.A. (2020). Nanoparticles' synthesis and their application in the management of phytonematodes: An overview. En: *Management of Phytonematodes*:

Recent Advances and Future Challenges, pp. 125–140. Springer. doi: 10.1007/978-981-15-4087-5_6

- Fahey, J.W., Zalcmann, A.T. y Talalay, P. (2001). The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry*, 56(1): 5–51. doi: 10.1016/S0031-9422(00)00316-2
- Farzaneh, A., Saghatoleslami, N., Goharshadi, E.K., Gharibi, H. y Ahmadzadeh, H. (2016). 3-D mesoporous nitrogen-doped reduced graphene oxide as an efficient metal-free electrocatalyst for oxygen reduction reaction in alkaline fuel cells: Role of π and lone pair electrons. *Electrochimica Acta*, 222: 608–618. doi: 10.1016/j.electacta.2016.11.015
- Fincheira, P., Tortella, G., Seabra, A.B., Diez, M.C. y Durán, N. (2023). Eco-efficient systems based on nanocarriers for the controlled release of fertilizers and pesticides: Toward smart agriculture. *Nanomaterials*, 13(13), artículo 1978. doi: 10.3390/nano13131978
- Gawande, V., Razauddin, Das, H., Gautam, R., Manisankar, G., Bhuyan, S. y Kurdekar, A.K. (2023). Exploring the future of agriculture through nanotechnology: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10): 215–228. doi: 10.9734/ijecc/2023/v13i102632
- Geng, D., Yang, S., Zhang, Y., Yang, J., Liu, J., Li, R., Sham, T.-K., Sun, X., Ye, S. y Knights, S. (2011). Nitrogen doping effects on the structure of graphene. *Applied Surface Science*, 257(21): 9193–9198. doi: 10.1016/j.apsusc.2011.05.30
- Ghosh, S., Roy, P., Das, S. y Mukherjee, A. (2023). Plant-derived nanomaterials for targeted biological applications and smart agriculture. *ChemistrySelect*, 8(47), artículo e202303495. doi: 10.1002/slct.202303495
- Gupta, A., Singh, D. y Prasad, R. (2020). New insights into application of nanoparticles for plant growth promotion: Present and future prospects. En: *Biogenic Nano-Particles and Their Use in Agro-Ecosystems*, pp. 259–279. Springer. doi: 10.1007/978-981-15-2985-6_15
- Hadi, A., Ariaei, A. y Ghasemi, A. (2018). Graphene nanosheets preparation using magnetic nanoparticle assisted liquid phase exfoliation of graphite: The coupled effect of ultrasound and wedging nanoparticles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44: 204–214. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.006
- Hanlon, P.R., Webber, D.M. y Barnes, D.M. (2007). Aqueous extract from Spanish black radish (*Raphanus sativus* L. var. *niger*) induces detoxification enzymes in the HepG2 human hepatoma cell line. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(16): 6439–6446. doi: 10.1021/jf070530f
- He, Y., Hu, R. y Zhu, H. (2018). Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil. *Nano Research*, 11: 1928–1937. doi: 10.1007/s12274-017-1810-1
- Hu, X., Sun, J., Li, Y. y Niu, Q. (2014). Interactions between graphene oxide and plant cells: Regulation of cell morphology, uptake, organelle damage, oxidative effects and metabolic disorders. *Carbon*, 80: 665–676.
- Iavicoli, I., Leso, V., Beezhold, D. y Shvedova, A. (2017). Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 329: 96–111. doi: 10.1016/j.taap.2017.05.025
- Jahangir, M., Kim, H.K., Choi, Y.H. y Verpoorte, R. (2009). Healthy and unhealthy plants: The effect of stress on the metabolism of Brassicaceae. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1): 23–33. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.06.016

- Johnston, C.T. (2010). Probing the nanoscale architecture of clay minerals. *Clay Minerals*, 45(3): 245–279. doi: 10.1180/claymin.2010.045.3.245
- Joshi, H., Meena, D. y Tank, H.K. (2018). Nanotechnology in agriculture: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7: 1763–1770. doi: 10.20546/ijcmas.2018.712.205
- Kah, M., Tufenkji, N. y White, J.C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature Nanotechnology*, 14(6): 532–540.
- Kim, D.-Y., Gopal, J., Sivanesan, I., Muthu, M., Paulraj, P. y Chun, S. (2018). Recent developments in nanotechnology transforming the agricultural sector: A transition replete with opportunities. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(3): 849–864. doi: 10.1002/jsfa.8749
- Kim, M.J., Kim, W. y Chung, H. (2020). Effects of silver-graphene oxide on seed germination and early growth of crop species. *PeerJ*, 8, artículo e8387. doi: 10.7717/peerj.8387
- Lee, J.Y., Kim, M.J. y Chung, H. (2021). Effects of graphene oxide on germination and early growth of plants. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 21(10): 5282–5288.
- Laghari, S.J., Wahocho, N.A., Laghari, G.M., Laghari, A.H., Bhabhan, G.M., Talpur, K.H. y Lashari, A.A. (2016). Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9): 209–219.
- Li, Y., Li, Y., Zhang, P., Wang, J., Wang, L., Zhang, Y. y Zhang, C. (2021). Magnesium-nitrogen co-doped carbon dots enhance plant growth through multifunctional regulation in photosynthesis. *Chemical Engineering Journal*, 422, artículo 130114. doi: 10.1016/j.cej.2021.130114
- Liang, X., Zhi, L., Guo, W., Han, B., Zhang, J. y Liu, Z. (2015). Hydrothermal synthesis of highly nitrogen-doped few-layer graphene via solid–gas reaction. *Materials Research Bulletin*, 61: 252–258. doi: 10.1016/j.materresbull.2014.10.053
- Lira-Saldivar, R.H., Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I. y De los Santos-Villarreal, G. (2023). Phyto-toxicity by nanotube of carbon multi walls and graphite oxide nanoparticles in plants of *Raphanus sativus*. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 3(3). doi: 10.22533/at.ed.973332329032
- Liu, Z., Zhou, M., Liao, W., Liu, J., Luo, C., Lu, C., Chen, Z. y Zhu, H. (2023). Fertilizer-holding performance of graphene on soil colloids based on double electric layer theory. *Materials*, 16(7), artículo 2578. doi: 10.3390/ma16072578
- Long, D., Li, W., Ling, L., Miyawaki, J., Mochida, I. y Yoon, S.-H. (2010). Preparation of nitrogen-doped graphene sheets by a combined chemical and hydrothermal reduction of graphene oxide. *Langmuir*, 26(20): 16096–16102.
- Lu, K., Wu, L., Liao, L., Zhu, T. y Chen, W. (2020). Uptake of graphene enhanced the photophosphorylation performed by chloroplasts in rice plants. *Nano Research*, 13: 3198–3205. doi: 10.1007/s12274-020-2994-1
- Mehrabani, L.V., Hassanpouraghdam, M.B., Lakzian, A. y Bernousi, I. (2023). Foliar application of graphene oxide, nano-Fe, and selenium mitigates salinity depression on *Ocimum basilicum*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(4): 510–528. doi: 10.55730/1300-011X.3086
- Miguel-Rojas, C. y Pérez-de-Luque, A. (2023). Nanobiosensors and nanoformulations in agriculture: New advances and challenges for sustainable agriculture. *Emerging Topics in Life Sciences*, 7(2): 229–238.

- Milojević, S. (2012). Multidisciplinary cognitive content of nanoscience and nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research*, 14, artículo 685.
- Milton, R.D. y Minteer, S.D. (2017). Enzymatic bioelectrosynthetic ammonia production: Recent electrochemistry of nitrogenase, nitrate reductase, and nitrite reductase. *ChemPlusChem*, 82(4): 513–521. doi: 10.1002/cplu.201600548
- Mondal, A., Basu, R., Das, S. y Nandy, P. (2011). Beneficial role of carbon nanotubes on mustard plant growth: An agricultural prospect. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(10): 4519–4528. doi: 10.1007/s11051-011-0406-z
- Nair, R., Varghese, S.H., Nair, B.G., Maekawa, T., Yoshida, Y. y Kumar, D.S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179(3): 154–163. doi: 10.1016/j.plantsci.2010.04.012
- Nakamura, Y., Nakamura, K., Asai, Y., Wada, T., Tanaka, K., Matsuo, T. y Nishikawa, A. (2008). Comparison of the glucosinolate–myrosinase systems among Daikon (*Raphanus sativus*, Japanese white radish) varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(8): 2702–2707. doi: 10.1021/jf7035774
- Ngouajio, M. y Mutch, D.R. (2004). *Oilseed Raphanus sativus: A new cover crop for Michigan*. Michigan State University Extension Bulletin E-2907.
- Nouri, A., Khoshgoftarmanesh, A.H., Malakouti, M.J. y Bahrami, H. (2017). Effects of nanofertilizers on germination and early seedling growth of crops: A review. *Journal of Nanomaterials*, 2017, artículo ID 5809463.
- Parisi, C., Vignani, M. y Rodríguez-Cerezo, E. (2015). Agricultural nanotechnologies: What are the current possibilities? *Nano Today*, 10(2): 124–127. doi: 10.1016/j.nantod.2014.09.009
- Pei, S. y Cheng, H.-M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9): 3210–3228. doi: 10.1016/j.carbon.2011.11.010
- Pei, X., Wang, L., Duan, X., Liu, J. y Guo, Z. (2013). Nanocomposite of graphene oxide and nitrogen-doped TiO₂. *Carbon*, 60: 597–606. doi: 10.1016/j.carbon.2013.04.055
- Pereira, A. do E.S., Oliveira, H.C., Fraceto, L.F. y Santaella, C. (2021). Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 11(2): 267. doi: 10.3390/nano11020267
- Pérez Gutiérrez, R.M. y Lule Pérez, R. (2004). *Raphanus sativus* (radish): Their chemistry and biology. *The Scientific World Journal*, 4: 811–837. doi: 10.1100/tsw.2004.131
- Pérez-Gutiérrez, R.M. y Pérez, R.L. (2004). *Raphanus sativus* L. radish: Their chemistry and biology. *The Scientific World Journal*, 4: 811–837. doi: 10.1100/tsw.2004.131
- Pham, V., Lagoute, J., Mouhoub, O., Joucken, F., Repain, V., Chacon, C., Bellec, A., Girard, Y. y Rousset, S. (2014). Electronic interaction between nitrogen-doped graphene and porphyrin molecules. *ACS Nano*, 8(3): 2764–2770. doi: 10.1021/nn500517k
- Prasad, R., Bhattacharyya, A. y Nguyen, Q.D. (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 8, artículo 1014.
- Raab, T.K. y Terry, N. (1994). Nitrogen source regulation of growth and photosynthesis in *Beta vulgaris* L. *Plant Physiology*, 105(4): 1159–1166. doi: 10.1104/pp.105.4.1159
- Rani, A., Tokas, J., Punia, H. y Kumar, S. (2020). Nanomaterials for improving nutrient use efficiency in agriculture. En: *Nanotechnology in Agriculture: Advances and Applications*, pp. 35–62.

- Rao, K.S., El-Amin, M.F., Watanabe, T., Ishiguro, H., Takanabe, K. y Antonietti, M. (2017). Enhanced sensing using NiCo₂O₄@nitrogen-doped reduced graphene oxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 245: 748–755. doi: 10.1016/j.snb.2017.02.081
- Rickman, D., Luvall, J., Mask, P., Shaw, J., Kissel, D. y Sullivan, D. (2003). Precision agriculture: Changing the face of farming. *Geotimes*, 48(2): 22–25.
- Royal Society y Royal Academy of Engineering. (2004). *Nanoscience and nanotechnologies: Opportunities and uncertainties*. Policy document 20/04, Londres: RS & RAE.
- Safikhani, S., Chaichi, M.R., Khoshbakht, K., Amini, A. y Moteszarehadeh, B. (2018). Application of nanomaterial graphene oxide on biochemical traits of milk thistle (*Silybum marianum* L.) under salinity stress. *Australian Journal of Crop Science*, 12(6): 931–936. doi: 10.21475/ajcs.18.12.06.PNE972
- Saidin, N., Zen, D., Hamida, B., Khan, S., Ahmad, H., Dimiyati, K. y Harun, S. (2013). A Q-switched thulium-doped fiber laser with a graphene thin film based saturable absorber. *Laser Physics*, 23(11), artículo 115102. doi: 10.1088/1054-660X/23/11/115102
- Sajjad, S., Kim, D., Lim, S. y Ahn, J. (2017). Chemical functionalization of graphene oxide for applications in nanomaterial composites. *Nanomaterials*, 7(7), artículo 245. doi: 10.3390/nano7070245
- Sandoval, S., Kumar, N., Oró-Solé, J., Sundaresan, A., Rao, C., Fuertes, A. y Tobias, G. (2016). Tuning the nature of nitrogen atoms in N-containing reduced graphene oxide. *Carbon*, 96: 594–602. doi: 10.1016/j.carbon.2015.09.093
- Sekhon, B.S. (2014). Nanotechnology in agri-food production: An overview. *Nanotechnology, Science and Applications*, 7: 31–53.
- Shang, Y., Hasan, M.K., Ahammed, G.J., Li, M., Yin, H. y Zhou, J. (2019). Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: A review. *Molecules*, 24(14): 2558. doi: 10.3390/molecules24142558
- Shao, G., Lu, Y., Wu, F., Yang, C., Zeng, F. y Wu, Q. (2012). Graphene oxide: The mechanisms of oxidation and exfoliation. *Journal of Materials Science*, 47(10): 4400–4409. doi: 10.1007/s10853-012-6294-5
- Sharma, S., Singh, S., Ganguli, A. y Shanmugam, V. (2017). Anti-drift nano-stickers made of graphene oxide for targeted pesticide delivery and crop pest control. *Carbon*, 115: 781–790. doi: 10.1016/j.carbon.2017.01.093
- Siddiqui, Z.A., Parveen, A., Ahmad, L. y Hashem, A. (2019). Effects of graphene oxide and zinc oxide nanoparticles on growth, chlorophyll, carotenoids, proline contents and diseases of carrot. *Scientia Horticulturae*, 246: 886–893. doi: 10.1016/j.scienta.2018.11.072
- Singh, R.K., Kumar, R. y Singh, D.P. (2016). Graphene oxide: Strategies for synthesis, reduction and frontier applications. *RSC Advances*, 6: 64993–65011. doi: 10.1039/C6RA07626B
- Soo, Y.C., Kim, H., Lee, C.J. y Lee, J. (2017). Effect of varying ratios of precursors on the synthesis of nitrogen-doped graphene. *Electrochimica Acta*, 245: 507–517. doi: 10.1016/j.electacta.2017.05.172
- Spanos, A., Athanasiou, K., Ioannou, A. y Fotopoulos, V. (2021). Functionalized magnetic nanomaterials in agricultural applications: A review. *Nanomaterials*, 11(3), artículo 637. doi: 10.3390/nano11030637

- Sun, H., Wang, Y., Liu, S., Ge, L., Wang, L., Zhu, Z. y Wang, S. (2013). Facile synthesis of nitrogen-doped reduced graphene oxide as a superior metal-free catalyst for oxidation. *Chemical Communications*, 49(91): 9914–9916. doi: 10.1039/C3CC43401J
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S.A., ur Rehman, H., Ashraf, I. y Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges, and future opportunities. *Science of the Total Environment*, 721, artículo 137778. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137778
- Van Khai, T., Na, H.G., Kwak, D.S., Kwon, Y.J., Ham, H., Shim, K.B. y Kim, H.W. (2012). Influence of N-doping on the structural and photoluminescence properties of graphene oxide films. *Carbon*, 50(10): 3799–3806. doi: 10.1016/j.carbon.2012.04.005
- Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R. y Ahmad, N. (2021). Controlled release fertilizers: A review on developments, applications, and potential in agriculture. *Journal of Controlled Release*, 339: 135–145. doi: 10.1016/j.jconrel.2021.09.021
- Vera-Reyes, I., López-García, M., Ruiz-Torres, N.A., Méndez-Argüello, B. y Lira-Saldivar, R.H. (2024). Graphene oxide nanoparticles and graphite microparticles on seeds germination and growth of *Solanum lycopersicum* seedlings. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 17(32): 1e–14e. doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69734
- Waldner, J.B. (2008). *Nanocomputers and Swarm Intelligence*. Wiley-ISTE, Londres.
- Wang, X., Liu, S., Li, Z., Li, S., Yan, H., He, Y. y Li, H. (2023). Regulatory effect of graphene on growth and carbon/nitrogen metabolism of maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14, artículo 1057133. doi: 10.3389/fpls.2023.1057133
- Waychunas, G.A., Kim, C.S. y Banfield, J.F. (2005). Nanoparticulate iron oxide minerals in soils and sediments: Unique properties and contaminant scavenging mechanisms. *Journal of Nanoparticle Research*, 7(4–5): 409–433. doi: 10.1007/s11051-005-6931-x
- Witjaksono, G., Junaid, M., Khir, M.H.M., Ullah, Z., Tansu, N., Saheed, M.S.M., Siddiqui, M.J., Ba-Hashwan, S.S., Algamili, A.D., Magsi, S.A., Aslam, M. y Nawaz, R. (2021). Effect of nitrogen doping on the optical bandgap and electrical conductivity of nitrogen-doped reduced graphene oxide. *Molecules*, 26(21), artículo 6424. doi: 10.3390/molecules26216424
- Wu, L., Zhang, Q., Liu, D., Luo, Y. y Wang, H. (2017). Anionic cerium oxide nanoparticles protect plant leaves from damage induced by oxidative stress. *Environmental Science: Nano*, 4(11): 2317–2327. doi: 10.1039/C7EN00576A
- Xia, Z., Bellani, V., Sun, J. y Palermo, V. (2020). Electrochemical exfoliation of graphite in H₂SO₄, Li₂SO₄ and NaClO₄ solutions monitored in situ by Raman microscopy and spectroscopy. *Faraday Discussions*, 227: 207–219. doi: 10.1039/D0FD00045H
- Yan, N., Cao, J., Wang, J., Zou, X., Yu, X., Zhang, X. y Si, T. (2024). Seed priming with graphene oxide improves salinity tolerance and increases productivity of peanut through modulating multiple physiological processes. *Journal of Nanobiotechnology*, 22(1), artículo 565. doi: 10.1186/s12951-024-01856-7
- Yin, L., Wang, Z., Wang, S., Xu, W. y Bao, H. (2018). Effects of graphene oxide and/or Cd²⁺ on seed germination, seedling growth, and uptake to Cd²⁺ in solution culture. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, artículo 151. doi: 10.1007/s11270-018-3809-y
- Yokwana, K., Ntsendwana, B., Nxumalo, E. y Mhlanga, S.D. (2023). Recent advances in nitrogen-doped graphene oxide nanomaterials: Synthesis and applications in energy storage, sensor

- electrochemical applications and water treatment. *Journal of Materials Research*, 38(13): 1707–1725. doi: 10.1557/s43578-023-01070-1
- Yu, P., Tian, Z., Lowe, S.E., Song, J., Ma, Z., Wang, X., Han, Z., Bao, Q., Simon, G.P., Li, D. y Zhong, Y.L. (2016). Mechanically-assisted electrochemical production of graphene oxide. *Chemistry of Materials*, 28(23): 8429–8438. doi: 10.1021/acs.chemmater.6b04415
- Zhang, H., Tang, M. y Wang, B. (2021). Graphene oxide exhibited effects on growth of *Aloe vera* through increasing nutrient uptake and photosynthesis. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(4): 815–824. doi: 10.1007/s12298-021-00979-3
- Zhao, Y., Xiong, L., Yin, J., Zha, X., Li, W. y Han, Y. (2024). Understanding the effects of flash drought on vegetation photosynthesis and potential drivers over China. *Science of The Total Environment*, 931, artículo 172926. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172926