

Luis Alberto Marin-Tapia

<https://doi.org/10.35381/i.p.v7i13.4589>

Síntesis de grafeno a partir de grafito mediante un acelerador de electrones

Synthesis of graphene from graphite using an electron accelerator

Luis Alberto Marin-Tapia
lmartin@udet.edu.ec
Universidad de Especialidades Turísticas, Quito, Pichincha
Ecuador
<https://orcid.org/0009-0008-2301-9042>

Recibido: 02 de marzo 2025
Revisado: 03 de abril 2025
Aprobado: 27 de junio 2025
Publicado: 01 de julio 2025

Luis Alberto Marin-Tapia

RESUMEN

El objetivo es desarrollar un método de síntesis de grafeno en fase líquida empleando un acelerador de electrones, el cual permitió romper las fuerzas de Van der Waals del grafito. Se evaluaron distintas variables como el tipo de disolvente, tiempos de licuación, velocidades y dosis de radiación. Las muestras fueron centrifugadas a 1000 rpm durante 10 minutos. Mediante espectroscopía UV se identificaron picos característicos de grafeno entre 264 y 267 nm, correspondientes a la transición π - π^* . El análisis infrarrojo reveló la presencia de grupos funcionales como hidroxilos, carbonilos y aminos, siendo más variados en muestras con DMF y etanol. La caracterización morfológica mediante microscopía electrónica de barrido evidenció láminas transparentes con superficies lisas y bordes irregulares, confirmando la síntesis de grafeno. Los resultados permitieron establecer un procedimiento eficiente y reproducible, viable para implementarse a escala industrial por su bajo costo, sencillez y alta efectividad en la obtención de grafeno micrométrico.

Descriptores: Grafeno; acelerador de electrones; disolventes orgánicos; espectroscopía UV; microscopía electrónica de barrido (Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

The objective was to develop a method of synthesizing graphene in liquid phase using an electron accelerator, which facilitated the disruption of the Van der Waals forces of graphite. Various parameters were evaluated, including solvent type, liquefaction times, stirring speed, and radiation dose. The samples were centrifuged at 1000 rpm for 10 minutes. UV spectroscopy detected characteristic graphene absorption peaks between 264 and 267 nm, corresponding to the π - π^* transition. Infrared spectroscopy revealed the presence of functional groups such as hydroxyls, carbonyls and amines, being more diversified in samples treated with DMF and ethanol. Morphological characterization via scanning electron microscopy evidenced transparent films with smooth surfaces and irregular edges, confirming successful graphene synthesis. The results established an efficient and reproducible procedure, suitable for industrial-scale due to its low cost, simplicity and high effectiveness in producing micrometric graphene.

Descriptors: Graphene; electron accelerator; organic solvents; UV spectroscopy; scanning electron microscopy. (UNESCO Thesaurus).

Luis Alberto Marin-Tapia

INTRODUCCIÓN

Desde su descubrimiento en 2004 por Andre Geim y Konstantin Novoselov, el grafeno ha captado la atención de la comunidad científica por sus propiedades físicas, químicas y estructurales excepcionales (Wen et al., 2023). Este material bidimensional, conformado por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una estructura hexagonal, (Villareal Valdiviezo et al., 2024) posee una alta conductividad térmica y eléctrica, gran resistencia mecánica, flexibilidad, transparencia y alta movilidad electrónica, lo que lo hace único y superior frente a otros materiales conocidos (Ashok Kumar et al., 2022). Debido a su enorme potencial, el grafeno ha sido objeto de múltiples investigaciones en las últimas dos décadas, aplicándose en campos como la electrónica, energía, biomedicina, recubrimientos inteligentes y sensores (Laraba et al., 2022).

Sin embargo, el principal reto en el aprovechamiento industrial del grafeno radica en la dificultad para sintetizarlo de manera eficiente, a gran escala, con alta calidad estructural y a bajo costo (Ramezani & Rahmani, 2024). La mayoría de los métodos actuales, como la exfoliación mecánica, la exfoliación química, la reducción de óxidos de grafeno, el crecimiento epitaxial sobre sustratos metálicos y la deposición química de vapor (CVD), presentan limitaciones importantes (Urcuyo et al., 2021). Algunos ofrecen grafeno de excelente calidad pero en pequeñas cantidades; otros permiten producción masiva, pero introducen defectos estructurales o emplean sustancias tóxicas, lo que representa un problema ambiental y sanitario (Chai et al., 2021).

Una de las técnicas que ha sido poco explorada en Latinoamérica y prácticamente inédita en Ecuador es la utilización de radiación ionizante, particularmente a través de un acelerador de electrones, para romper las fuerzas de Van der Waals que unen las capas de grafeno dentro del grafito. Esta técnica no requiere reactivos químicos agresivos, es ambientalmente amigable, fácilmente controlable, menos destructiva y podría ser escalable si se optimizan los parámetros adecuados. En este sentido, se propone un método innovador que utiliza radiación ionizante como medio físico para la exfoliación del

Luis Alberto Marin-Tapia

grafito y la obtención de grafeno, explorando diferentes disolventes que actúan como medio de suspensión tras el proceso de irradiación (Brik, 2022).

En el contexto ecuatoriano, esta investigación representa un hito al constituirse como la primera propuesta de síntesis de grafeno mediante irradiación con acelerador de electrones. Hasta la fecha, no se han reportado antecedentes locales sobre la aplicación de esta tecnología con fines de producción de nanomateriales como el grafeno, lo cual revela una oportunidad valiosa de innovación tecnológica, además de aportar al desarrollo científico nacional.

El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Técnicas Nucleares de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), con la colaboración técnica de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), que proporcionó acceso a su acelerador de electrones. La ejecución de esta investigación también responde a la necesidad de aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Biofísica, particularmente en lo relativo al uso y control de radiaciones ionizantes, en un campo de investigación avanzado y con alto impacto global (Marín Tapia, 2020).

Durante la exposición del grafito a dosis de 50 y 100 kGy mediante el acelerador de electrones, se consideraron tres disolventes diferentes: agua, etanol y dimetilformamida (DMF), con el objetivo de evaluar su influencia en la eficiencia del proceso de exfoliación. Posteriormente, las muestras fueron analizadas mediante espectroscopía UV-Visible, espectroscopía infrarroja y microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de determinar la concentración, el grado de funcionalización y la morfología del grafeno obtenido.

El grafito, utilizado como materia prima, es una forma cristalina del carbono que presenta una estructura laminar, compuesta por múltiples capas de grafeno apiladas (Vohle et al., 2021). Estas capas están unidas por fuerzas de Van der Waals, lo que facilita su separación mediante procesos físicos o químicos. La facilidad con la que sus capas pueden deslizarse unas sobre otras, junto con su abundancia y bajo costo, lo convierten

Luis Alberto Marin-Tapia

en una excelente fuente de grafeno. Se estima que un milímetro de grafito contiene alrededor de tres millones de capas de grafeno, lo que lo hace altamente eficiente para procesos de exfoliación.

Uno de los métodos más eficientes para la producción del grafeno es exfoliar el grafito (Sumdani et al., 2021). En cuanto a los disolventes utilizados, el agua destaca por su carácter neutro y su capacidad para generar radicales libres bajo radiación. El etanol, por su estructura polar y facilidad de evaporación, actúa como un disolvente eficaz para mantener la suspensión del material. El dimetilformamida (DMF), por su elevada polaridad, estabilidad térmica y capacidad de disolver compuestos orgánicos e inorgánicos, es utilizado en síntesis orgánica y se espera que tenga un comportamiento favorable frente a la irradiación. Resulta decisivo seleccionar un disolvente con una tensión superficial aproximada de 40 mJ/m^2 como medio de exfoliación, para asegurar la estabilidad de dispersión (Fang et al., 2024).

La síntesis del grafeno es básica por su amplia utilización en diferentes campos, utilizándose múltiples formas para su síntesis (Moosa & Abed, 2021). El uso de radiación ionizante, y particularmente del acelerador de electrones, permite una dosificación precisa de energía que induce la ruptura de enlaces sin necesidad de altas temperaturas ni reactivos contaminantes. Esta tecnología ha sido empleada con éxito en diversas áreas, como la esterilización de alimentos, la modificación de polímeros y la investigación de nuevos materiales. En este caso, se explora su aplicación en la síntesis de grafeno como una vía innovadora y sostenible.

Por todo lo expuesto, esta investigación aporta una metodología alternativa y sostenible para la obtención de grafeno, contribuyendo al desarrollo científico del país e incentivando futuras investigaciones en el campo de la nanotecnología mediante el uso de herramientas nucleares. La validación de esta técnica podría abrir nuevas oportunidades para la aplicación del grafeno en industrias nacionales e internacionales,

Luis Alberto Marin-Tapia

especialmente aquellas orientadas al desarrollo de dispositivos electrónicos, sensores, materiales compuestos y tecnologías limpias.

La hipótesis que guía esta investigación sostiene que la irradiación de grafito con un acelerador de electrones, en presencia de disolventes adecuados, permite romper eficazmente los enlaces interlaminares del grafito y obtener grafeno de pocas capas, con características estructurales identificables mediante técnicas de caracterización óptica y morfológica. A partir de ello, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible obtener grafeno de pocas capas mediante la irradiación de suspensiones de grafito con un acelerador de electrones a dosis de 50 y 100 kGy, utilizando agua, etanol y dimetilformamida como disolventes?

A partir del análisis se propone como objetivo general: Sintetizar grafeno a partir de grafito mediante un acelerador de electrones con dosis de 50 y 100 kGy.

MÉTODO

Esta investigación adopta un diseño experimental de tipo factorial 3^3 , con enfoque cuantitativo, destinado a sintetizar grafeno a partir de grafito pulverizado usando tres diferentes disolventes: agua destilada, etanol y N,N-dimetilformamida (DMF). En cada disolvente se diluirán 3 gramos de grafito, manteniéndose constante tanto la cantidad de solvente (500 ml) como la cantidad de grafito por experimento.

El diseño factorial considera tres factores principales: tiempo de licuación, velocidad de licuación, y dosis de irradiación, cada uno con tres niveles:

- El tiempo de licuación se variará entre 2, 5 y 7 horas.
- La velocidad de licuación se establecerá en tres porcentajes: 99%, 75% y 50%.
- La dosis de irradiación aplicada a las muestras será de 50 kGy y 100 kGy.

Adicionalmente, se mantendrán constantes las revoluciones por minuto de centrifugación (1000 rpm) y el tiempo de centrifugación (10 minutos) para todas las muestras.

Luis Alberto Marin-Tapia

La combinación de estos factores da lugar a 18 tratamientos experimentales únicos, cada uno será replicado tres veces para asegurar la validez estadística. En cada tratamiento se registrará si se logra o no la síntesis de grafeno, lo que constituye la variable de respuesta cualitativa de la investigación.

Modelo estadístico

Para analizar los datos del experimento, se aplicará un modelo estadístico basado en un análisis de varianza (ANOVA) para diseño factorial con tres factores. El modelo puede expresarse como:

$$X_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (ABC)_{ijk} + u_{ijkl}$$

Donde:

μ representa la media general.

A_i , B_j , C_k son los efectos principales de los factores tiempo de licuación, velocidad de licuación y dosis de irradiación, respectivamente.

$(AB)_{ij}$ es la interacción entre el tiempo y la velocidad de licuación.

$(ABC)_{ijk}$ representa la interacción triple entre los tres factores.

u_{ijkl} es el error aleatorio.

Este modelo permitirá identificar tanto los efectos individuales como las interacciones entre factores en la síntesis de grafeno.

Población de estudio

La población objeto de estudio está conformada por las muestras de grafito disueltas en diferentes disolventes y sometidas a los tratamientos experimentales mencionados. Dado que en el país no existe producción industrial de grafeno, los resultados obtenidos en esta investigación podrían contribuir a futuras iniciativas industriales en Ecuador. En total se trabajará con 54 muestras, que corresponden a las 18 combinaciones de tratamientos experimentales, cada una repetida tres veces.

Luis Alberto Marin-Tapia

Materiales, compuestos y equipos

Para la síntesis de grafeno se emplearon los siguientes compuestos:

- Agua destilada: con una pureza del 100%, proveniente de Baterías Ecuador.
- Etanol: con una pureza del 99,5%, adquirido de PURIQUIM REAGENT.
- N,N-dimetilformamida (DMF): con una pureza del 99,8%, de LABDIN INSTRUMENTS.
- Grafito pulverizado: con una composición del 94,11% de carbono fijo y 4,69% de ceniza.

Entre los materiales utilizados destacan vasos de precipitación de distintos tamaños, vidrios reloj, espátulas, pipetas de varios volúmenes, probetas, termómetros, tubos de ensayo, morteros, frascos de vidrio, entre otros utensilios de laboratorio.

Los equipos empleados incluyen: licuadora de alta velocidad (UMCO), motor refrigerante (Schuar Duhly), centrífuga (Hermle Z 206 A), estufa (ESCO), sorbona (BIOBASE), balanza electrónica de alta precisión (OHAUS), espectrofotómetro IR (JASCO FT/IR-4100), espectrofotómetro UV-Visible (Thermo Scientific G10s), y un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-IT500HR). Las muestras fueron irradiadas con una fuente de electrones acelerados provista por la empresa Techxabexport, con dosis entre 30 y 100 kGy.

Preparación de las muestras

El proceso de preparación inicia con la limpieza rigurosa del material de laboratorio, usando agua destilada, detergente y posterior secado en estufa a 70 °C durante dos horas. Luego se pesa la cantidad correspondiente de grafito (3 g) y se disuelve en 500 ml del disolvente correspondiente (agua, etanol o DMF). La mezcla es homogeneizada con una varilla de agitación y posteriormente se somete al proceso de licuación, controlando tiempo y velocidad. Se enfría con motor refrigerante y se registran las temperaturas obtenidas por reacción exotérmica.

Luis Alberto Marin-Tapia

Las muestras se depositan en tubos de ensayo y se dejan reposar. Posteriormente, se introducen en contenedores de aluminio y son irradiadas en el acelerador de electrones, recibiendo dosis controladas de radiación (30, 50, 80 o 100 kGy). Luego son centrifugadas y se procede con su caracterización.

Técnicas de recolección de datos

Para evaluar la presencia de grafeno sintetizado, se utilizaron las siguientes técnicas instrumentales:

- Espectroscopía UV-Visible: Se identificó el pico de absorbancia característico del grafeno, el cual se encuentra entre los 260 y 270 nm. Se emplearon celdas de cuarzo con las mezclas previamente centrifugadas, y se realizaron barridos de longitud de onda desde 190 hasta 800 nm.
- Espectroscopía Infrarroja (FTIR): Esta técnica se utilizó para descartar la presencia de grupos funcionales no deseados. Las muestras se analizaron sobre un cristal de seleniuro de zinc, realizando barridos entre 4168 y 418 cm^{-1} .
- Microscopía Electrónica de Barrido: Se empleó para analizar la morfología del grafeno sintetizado. Las muestras fueron depositadas en stubs de aluminio, secadas a 70 °C durante dos horas y analizadas en modo bajo vacío con un voltaje entre 5 y 15 keV, permitiendo observar la estructura laminar característica del grafeno.

RESULTADOS

Dispersión de grafeno

Uno de los principales desafíos para lograr dispersiones estables de grafeno durante su síntesis son las fuerzas de Van der Waals que provocan la reagrupación de las capas exfoliadas (Covarrubias-Gordillo et al., 2023). Para contrarrestar este efecto, se han

Luis Alberto Marin-Tapia

considerado los parámetros de solubilidad de Hansen, los cuales permiten seleccionar disolventes cuya afinidad con el grafeno facilite una mejor dispersión.

El grafeno presenta valores de parámetro dispersivo (δD) de $18 \text{ MPa}^{0.5}$, parámetro polar (δP) de $9,3 \text{ MPa}^{0.5}$, y de enlace de hidrógeno (δH) de $7,7 \text{ MPa}^{0.5}$. Comparativamente, el agua tiene un δP y δH mucho más altos, lo que la hace menos afín al grafeno, mientras que el etanol y, especialmente, el DMF muestran parámetros más cercanos a los del grafeno, lo que sugiere una mayor compatibilidad dispersiva.

Durante la licuación de las mezclas grafito-disolvente, se produjeron reacciones exotérmicas. Por ejemplo, en el caso del agua como disolvente, a 2 horas y 50% de velocidad se alcanzaron 47°C , mientras que a 100% de velocidad, la temperatura llegó a 62°C . A medida que el tiempo de licuación aumentó a 7 horas, la temperatura se mantuvo en torno a los $60\text{--}62^\circ\text{C}$ en todas las velocidades.

En el caso del etanol, se observaron temperaturas similares a las del agua, pero con ligeros aumentos: desde 50°C a 57°C a 2 horas, y hasta 71°C a 5 y 7 horas con velocidad al 100%. En cambio, con el DMF, se evidenció un comportamiento más extremo: a 5 y 7 horas y a velocidad máxima, se alcanzaron hasta 102°C , lo que sugiere una interacción más intensa con el grafito.

Dado que el acelerador de electrones sólo emitía un máximo de 30 kGy por pasada, cada muestra fue irradiada cuatro veces para alcanzar dosis acumuladas de 30, 50, 80 y 100 kGy . Las temperaturas registradas tras la irradiación aumentaron proporcionalmente con la dosis: aproximadamente $49,33^\circ\text{C}$ para 30 kGy , $56,33^\circ\text{C}$ para 50 kGy , $65,53^\circ\text{C}$ para 80 kGy , y $71,67^\circ\text{C}$ para 100 kGy . Estos incrementos térmicos están relacionados con la ruptura de las fuerzas intermoleculares en el grafito, permitiendo así su exfoliación en grafeno.

Luis Alberto Marin-Tapia

Espectroscopía UV-Visible

Los espectros UV-Visible mostraron picos de absorbancia característicos del grafeno en el intervalo de 260 a 270 nm, relacionados con la transición π - π^* típica de estructuras basadas en carbono.

En agua, a 2 horas de licuación, se detectaron picos en 264 y 267 nm, con absorbancia máxima de 0,32 a 100% de velocidad y 50 kGy de dosis. A 5 horas, se obtuvo un pico de 0,4115 en 264 nm con 100 kGy. A 7 horas, el punto más relevante fue 0,4637 a 267 nm, también con velocidad máxima y 50 kGy.

Con etanol, las muestras presentaron buena estabilidad, especialmente a 5 horas, con valores de absorbancia similares en todas las velocidades. El valor más alto fue 0,4115 a 267 nm con 100% de velocidad y 100 kGy. En general, el etanol produjo menores absorbancias que el agua.

En el caso del DMF, los resultados fueron superiores. A 2 horas, se registró una absorbancia de hasta 0,4787 a 267 nm. A 5 horas y 100% de velocidad, tanto con 50 como con 100 kGy, se alcanzaron los valores más altos de todo el experimento: 0,5803. Estos datos sugieren que el DMF es el disolvente más eficaz para lograr una alta concentración de grafeno sin necesidad de aumentar el tiempo de licuación o la dosis de irradiación.

Espectroscopía infrarroja

La espectroscopía IR permitió identificar los grupos funcionales incorporados al grafeno como resultado de la irradiación, debido a la fragmentación de moléculas del disolvente que ocupan posiciones en la estructura del grafito.

En las muestras de agua-grafito, se detectaron los grupos C-OH (alcohol o fenol) a 3351 cm^{-1} , CH_3 y CH_2 (compuestos alifáticos) en torno a 1673 y 1470 cm^{-1} , y CH-OH (alcohol cíclico) a 1053–1055 cm^{-1} . La composición se mantuvo similar en dosis de 50 y 100 kGy.

Luis Alberto Marin-Tapia

En las muestras de etanol-grafito, se identificaron los mismos grupos funcionales, aunque con variaciones en sus longitudes de onda. Destacan valores como 3641 y 2971 cm^{-1} para C-OH y CH_3 respectivamente, y nuevamente CH-OH cerca de 1090 cm^{-1} .

El análisis del grafeno sintetizado con DMF mostró una mayor complejidad funcional. Se encontraron grupos amida (C-NH_2 y CH-NH_2) a 2834 y 1663 cm^{-1} , así como enlaces C=C a 1463 cm^{-1} . También se confirmaron múltiples señales correspondientes a grupos CH_3 , CH_2 , y alcoholes cíclicos (1064 y 1055 cm^{-1}). Esta variedad sugiere una mayor modificación estructural inducida por la irradiación en este medio.

Microscopía electrónica de barrido

Las imágenes obtenidas mediante SEM mostraron diferencias morfológicas importantes según el disolvente empleado. Con agua, las láminas observadas fueron planas, transparentes y de forma irregular. Se evidenciaron aglomeraciones en algunas zonas, lo que sugiere que no todas las capas se exfoliaron completamente. En las muestras de etanol, las láminas mostraban una forma irregular con zonas parcialmente exfoliadas, lo que indicaría un menor rendimiento en comparación con los otros disolventes.

En el caso del DMF, las imágenes revelaron capas completamente separadas del grafito, con zonas homogéneas y oscurecidas que corresponden a una alta concentración de grafeno. A pesar de la presencia de algunas láminas de grafito no separadas, la eficiencia de exfoliación fue notable.

DISCUSIÓN

Los resultados confirman que todas las muestras presentan un pico de absorbancia entre 260 y 270 nm , lo cual es característico de los alótropos de carbono. La eficiencia de la exfoliación depende de múltiples factores, como el tipo de disolvente, tiempo y velocidad de licuación, así como la dosis de irradiación (Vacacela Gomez et al., 2021).

Luis Alberto Marin-Tapia

En el caso del agua, el mejor resultado se alcanzó a 7 horas, 100% de velocidad y 50 kGy, con una absorbancia de 0,4637. El etanol mostró resultados aceptables, aunque más bajos, alcanzando un máximo de 0,4115 bajo condiciones similares.

El disolvente más eficiente fue el DMF, alcanzando el mayor nivel de absorbancia de todo el estudio: 0,5803 a 5 horas, 100% de velocidad y 50 kGy. Este hallazgo sugiere que no es necesario prolongar el tiempo de licuación para aumentar la concentración de grafeno, ya que 5 horas es suficiente para lograr una exfoliación eficiente. Además, utilizar 50 kGy en lugar de 100 kGy representa una ventaja energética considerable.

Visualmente, las muestras con etanol mostraron mayor transparencia, lo cual está asociado a un menor contenido de grafeno o mayor presencia de partículas no exfoliadas. Las suspensiones con DMF fueron más oscuras y homogéneas, señal de una mejor dispersión y mayor rendimiento en la exfoliación.

Por último, la centrifugación jugó un papel crucial en la separación de las capas exfoliadas, permitiendo conservar las más finas en el sobrenadante y eliminando las partículas no exfoliadas. Publicaciones previas sugieren que una mayor velocidad de centrifugación mejora significativamente la estabilidad de los coloides de grafeno. Esto, junto con la posibilidad de reutilizar el material no exfoliado, hace del proceso propuesto una ruta viable y escalable para la producción de grafeno de calidad a nivel industrial. El estudio de nuevos métodos de obtención del grafeno se actualiza constantemente, con la aparición de nuevos procesos de preparación y el estudio continuo y profundo del mecanismo de exfoliación (Liu et al., 2022).

CONCLUSIONES

Con un acelerador de electrones se realizó la irradiación de las muestras obtenidas, mismas que se iniciaron con grafito y se emplearon tres disolventes con diferentes puntos de ebullición y coeficiente dispersivo mediante exfoliación en fase líquida, se variaron

Luis Alberto Marin-Tapia

diferentes parámetros en el proceso como el tiempo y velocidad de licuación para posteriormente lograr la síntesis de grafeno.

Mediante espectroscopia UV-visible se pudo comprobar la presencia del grafeno por su pico característico en 264 y 267nm que corresponde a la transición $\pi-\pi^*$, observando un punto de equilibrio en el disolvente de DMF con sus distintas concentraciones debido a que sus muestras exponen un comportamiento similar al incrementar el tiempo y velocidad de licuación.

El espectro infrarrojo se analizó a las suspensiones de grafeno demostrando la existencia de distintos grupos funcionales presentes en el mismo, para el etanol se evidenciaron grupos hidroxilos en torno a los 3200 cm^{-1} , mientras que en dimetilformamida se determinó la presencia de grupos aminos, carbonilos y nitrocompuestos en rangos de 1000-1500 cm^{-1} , en cambio en el disolvente agua no se pudo observar sus grupos funcionales debido a que el equipo solo detecta grupos funcionales orgánicos adheridos al material.

La morfología de las capas de grafeno fue estudiada cualitativamente mediante microscopia electrónica de barrido la cual permitió observar la tonalidad transparente de las superficies irregulares propias del grafeno mostradas en una escala de 2 μm con una intensidad de 10 kV.

Se recomienda durante la licuación dejar reposar por cada hora de licuación 15 minutos de descanso para el caso de la mezcla de DMF-grafito mientras que para agua-grafito y etanol-grafito debe reposar por cada hora de licuación 10 minutos además durante este proceso esté libre de impurezas.

Es recomendable recolectar los residuos después de cada proceso para realizar una recuperación de solventes el cual se puede volver a procesos de licuación e irradiación para sintetizar grafeno.

Luis Alberto Marin-Tapia

Al momento de la irradiación se deben considerar seguridad radiológica para evitar cualquier accidente, siempre debe estar presente una persona encargada del equipo con conocimientos de este.

FINANCIAMIENTO

No monetario.

AGRADECIMIENTO

A todos los actores sociales involucrados en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Ashok Kumar, S. S., Bashir, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2022). A review on graphene and its derivatives as the forerunner of the two-dimensional material family for the future. *Journal of Materials Science*, 57, 12236–12278. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07346-x>
- Brik, D. (6 de julio de 2022). Grafeno sintetizado en Ecuador, un proyecto pionero de alentadores resultados. *SWI swissinfo.ch*. <https://n9.cl/ns0p0n>
- Chai , L., Cui, X. j., Qi , Y. q., Teng, N., Hou, X. l., & Deng , T. s. (2021). A new strategy for the efficient exfoliation of graphite into graphene. *New Carbon Materials*, 36(6), 1179-1186. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(21\)60100-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(21)60100-2)
- Fang, X., Pang, K., Zhao, G., Wang , Y., Zhang , W., Zhang , Y., Zhou, S., Zhang, J., & Gong, C. (2024). Improving the liquid phase exfoliation efficiency of graphene based on the enhanced intermolecular and interfacial interactions. *Chemical Engineering Journal*, 480. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148263>
- Covarrubias-Gordillo, C., Rivera-Salinas, J., Fonseca-Florido, H., Ávila-Orta, C., Medellín-Rodríguez, F., Medellín-Banda, D., & Pérez-Rodríguez, P. (2023). Enhancement of polypropylene mechanical behavior by the synergistic effect of mixtures of carbon nanofibers and graphene nanoplatelets modified with cold propylene plasma. *Applied Polymer*, 140(24). <https://doi.org/10.1002/app.53957>

Luis Alberto Marin-Tapia

- Laraba, S. R., Lou, W., Rezzoug, A., Zahrac , Q. u., Zhang, S., Wud , B., . . . Li, Y. (2022). Graphene-based composites for biomedical applications. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 15(3), 724-748. <https://doi.org/10.1080/17518253.2022.2128698>
- Liu, N., Tang, Q. G., Huang, B., & Wang, Y. (2022). Graphene Synthesis: Method, Exfoliation Mechanism and Large-Scale Production. *Crystals*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/cryst12010025>
- Marín Tapia, L. A. (2020). *Síntesis de grafeno a partir de grafito mediante un acelerador de electrones con dosis de 50 y 100 kGy*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo] DSpace ESPOCH. <https://n9.cl/k2fbw>
- Moosa, A., & Abed, M. (2021). Graphene preparation and graphite exfoliation. *Turkish Journal of Chemistry*, 45(3), 493-519. <https://doi.org/10.3906/kim-2101-19>
- Ramezani, M. J., & Rahmani, O. (2024). A review of recent progress in the graphene syntheses and its applications. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–33. <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2420911>
- Sumdani, M., Islam, S., Yahaya , A., & Safie , S. (2021). Recent advances of the graphite exfoliation processes and structural modification of graphene: a review. *Journal of Nanoparticle Research*, 23(253). <https://doi.org/10.1007/s11051-021-05371-6>
- Urcuyo, R., González-Flores, D., & Cordero-Solano, K. (2021). Perspectivas y aplicaciones. *Revista Colombiana de Química*, 50(1), 51-85. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v50n1.90134>
- Vacacela Gomez , C., Guevara, M., Tene , T., Villamagua, L., Tubon Usca, G., Maldonado, F., Tapia, C., Cataldo, A., Belluci, S., & Caputi, L. S. (2021). The liquid exfoliation of graphene in polar solvents. *Applied Surface Science*, 546. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149046>
- Villareal Valdiviezo, G. P., Múzquiz Ramos, E. M., Gallardo Heredia, M., & Ríos Hurtado, J. C. (2024). Electroquímica en Medicina: Grafeno y Electroestimulación Celular. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 45(2), 140-150. <https://doi.org/10.17488/rmib.45.2.8>
- Vohle, O., von Sturm, F., Wege, E., & Frohs, W. (2021). Graphite. Em *Industrial Carbon and Graphite Materials, Volume I: Raw Materials, Production and Applications* (pp. 89-103). Hubert Jäger, Wilhelm Frohs. <https://doi.org/10.1002/9783527674046.ch5>

Luis Alberto Marin-Tapia

Wen, Y., Liu , H., & Jiang, X. (2023). Preparation of graphene by exfoliation and its application in lithium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 961. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170885>

©2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).