

Obtención de tintas conductoras a base de grafeno por medio de exfoliación electroquímica

Obtaining graphene-based conductive inks by electrochemical exfoliation

Johan Rubio^{*}, Camilo Ospina^{**}, Luis Carvajal^{***} y Mikel Hurtado^{****}

Cómo citar:

Rubio, J., Ospina, C., Carvajal, L., & Hurtado, M. (2019). Obtención de tintas conductoras a base de grafeno por medio de exfoliación electroquímica. *Ingeciencia*, 4, 21-36.

- ^{*} Ingeniero electrónico, línea de profundización en Estado Sólido y Nanotecnología. Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: jrubior2@ucentral.edu.co
- ^{**} Ingeniero electrónico, línea de profundización en Estado Sólido y Nanotecnología. Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: cospinao@ucentral.edu.co
- ^{***} Ingeniero electrónico, MSc. en Bioingeniería y PhD. en Ingeniería Biomédica. Integrante del grupo de investigación Bioingeniería, Nanotecnología y Comunicaciones (SPIN). Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: lcarvajal1@ucentral.edu.co
- ^{****} Químico, MSc. en Chemical Thermodynamics, MSc. en Materials Science and Nanotechnology, PhD. en Solid State Chemistry. PostDoc. en Nanomaterials. Investigador senior reconocido por MinCiencias. Integrante de los grupos de investigación Bioingeniería, Nanotecnología y Comunicaciones (SPIN) y Maxwell. Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: hurtadom1@ucentral.edu.co

Resumen

El artículo se basa en el trabajo de tesis titulado “Desarrollo de tintas conductoras a base de grafeno y MoS₂ para impresoras Inkjet”. Específicamente, se estudian los nanomateriales a base de carbono que se emplean en la obtención del grafeno por medio de la exfoliación electroquímica en condiciones de atmósfera abierta, para utilizarlo como agente activo en el diseño de tintas con propiedades eléctricamente conductoras y de alta flexibilidad mecánica. Con este propósito, en el marco del trabajo de tesis se desarrollaron protocolos de fabricación en condiciones normales, en donde se obtuvieron 330 g de grafeno y posteriormente 990 ml de tintas conductoras, las cuales presentaron características de conducción eléctrica en el orden de 8 Ω/cm^2 . Además, se evidenció que las tintas son estables en función del tiempo y sus características fisicoquímicas no son afectadas cuando se exponen a temperaturas en el rango de 10 a 70° C. Los resultados representan un avance significativo en la línea de profundización en nanotecnología del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central, ya que actualmente en el mercado las tintas con estas propiedades tienen precios considerablemente altos y son de baja calidad en términos de sus propiedades físicas eléctricas y mecánicas.

Palabras clave: electrónica flexible, grafeno, nanotecnología, tinta conductora de electricidad, tintas inteligentes.

Abstract

The article is based on the thesis work entitled “Development of graphene-based conductive inks and MoS₂ for inkjet printers”. Specifically, the carbon-based nanomaterials used to obtain graphene by means of electrochemical exfoliation under open atmosphere conditions are studied, for use as an active agent in the design of inks with electrically conductive properties and high mechanical flexibility. For this purpose, in the framework of the thesis work, manufacturing protocols were developed under normal conditions, in which 330 g of graphene and 990 ml of conductive inks were obtained, which had electrical conduction characteristics in the order of 8 Ω/cm^2 . In addition, it was shown that inks are stable as a function of time and their physico-chemical characteristics are not affected when exposed to temperatures in the range of 10 to 70° C. The results represent a significant advance in the line of deepening in nanotechnology of the Department of Electronic Engineering of the Universidad Central, because currently in the market the inks with these properties have considerably high prices and are of low quality in terms of their electrical and mechanical physical properties.

Keywords: electrically conductive ink, flexible electronics, graphene, nanotechnology, smart inks.

1. Introducción

El grafeno fue observado en 2004 por los físicos Andre K. Geim y Konstantin S. Novoselov, al pegar un fragmento de cinta adhesiva sobre la superficie de un bloque de carbón grafito y retirarlo de forma manual. Sin embargo, solo hasta el año 2010 el grafeno comenzó a generar interés en el resto de los científicos cuando sus descubridores recibieron el Premio Nobel de Física (González, 2017). Desde que fue identificado, el grafeno ha sido considerado el material del futuro porque posee características de flexibilidad, alta conductividad eléctrica y térmica. No obstante, uno de los retos más importantes para utilizar este material son los métodos de obtención, entre los cuales se destacan los procesos de deposición química de vapor, método de descarga de arco, reducción química, exfoliación micromecánica y reducción térmica (Farías *et al.*, 2017). Estos procesos tienen en común que obtienen el grafeno en ambientes controlados, es decir en algunos casos es necesario exponer el material a condiciones de alto o ultraalto vacío, lo cual implica un alto costo de operación y procesos poco amigables con el medio ambiente.

El proyecto de tesis titulado “Desarrollo de tintas conductoras a base de grafeno y MoS₂ para impresoras Inkjet” se enfocó en obtener grafeno por medio de la exfoliación electroquímica realizado en atmósfera abierta para obtener tintas con características de conducción eléctrica, las cuales ofrecen alternativas en el área de la ingeniería, principalmente en el desarrollo de tecnologías livianas, transparentes y de alta flexibilidad mecánica. Además, las tintas que se presentan en este artículo pueden ser empleadas en otros campos, como en la fabricación de biosensores, donde el grafeno ha sido utilizado en la detección de biomoléculas para diagnosticar enfermedades y tratarlas (Yang *et al.*, 2013).

2. Marco teórico

2.1 Grafeno

Con un grosor de apenas un átomo de carbono, constituye el material bidimensional por excelencia. Es, de hecho, un cristal bidimensional, que presenta un ordenamiento atómico muy bien definido y que puede presentar cierta rugosidad superficial dependiendo del método de síntesis que se emplee para obtenerlo. Debido a su extremada delgadez, el grafeno es altamente transparente en la región del espectro visible y muy flexible, además tiene excepcionales propiedades térmicas, electrónicas, ópticas y mecánicas. Entre sus características más interesantes resaltan su elasticidad y resistencia mecánica, ya que puede deformarse elásticamente hasta el 10 % de su longitud, de modo que si el grafeno genera procesos de conformación mecánica sobre superficies de alta dureza sin que sus enlaces de carbono sufran rupturas, razón de su alta resistencia mecánica. Una lámina de grafeno de un metro cuadrado tiene una masa de 0,77 miligramos, lo que, en comparación con el acero (con la misma superficie), supondría una masa doscientas veces menor. Sin embargo, a pesar de su flexibilidad, el grafeno es un material cien veces más fuerte y resistente que el acero estructural con su mismo espesor. Es altamente rígido, de manera que soporta grandes fuerzas sin apenas deformarse. Tiene una resistencia mecánica de 42 N/m (tensión de rotura), mientras que una lámina del acero más resistente y del mismo espesor que el grafeno tendría aproximadamente una resistencia de 0,40 N/m (Martínez, 2015).

Adicionalmente, el grafeno tiene una estructura electrónica que le permite conducir electrones a temperatura ambiente más rápido que ningún otro material (Barros, 2010).

Las tintas conductoras se utilizan en la industria de la electrónica impresa para producir circuitos, diodos emisores de luz orgánicos, Radio Frequency Identification (RFID) y demás. Entre sus principales ventajas se encuentran la flexibilidad, el diseño liviano y los bajos costos de fabricación, ya que se trata de un componente conductor que se puede basar en un elemento metálico o en polímeros conductores de carbono. Sin embargo, cuando se usan tintas conductoras se enfrenta el desafío de conseguir mayor uniformidad en la aplicación, así como lograr una compatibilidad con varios sustratos sin afectar sus propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas (Méndez-Rossal & Wallner, 2019).

2.2 Obtención

Uno de los principales problemas que tienen los investigadores es llevar la producción de grafeno a escala industrial para fabricar las tintas. Hasta este momento, los métodos de obtención se limitan a entornos de laboratorio de investigación, aunque se espera que en un corto plazo la producción se promueva a escala industrial gracias a los estudios e investigaciones, de tal manera que sea una realidad encontrarlo en múltiples aplicaciones cotidianas. A continuación, se presentan los métodos para obtener el grafeno que se emplean actualmente.

2.2.1 Exfoliación micromecánica

El grafeno en estado libre fue obtenido por vez primera en 2004 mediante este método. La exfoliación micromecánica (Revoredo, 2018) es una técnica sencilla, en la cual es necesario contar con una superficie limpia de grafito. Este grafito está constituido por varias láminas superpuestas de grafeno débilmente unidas y que se pueden separar en láminas delgadas exfoliadas mediante este método (figura 1).



Figura 1. Grafeno obtenido por el método de exfoliación micromecánica.

Fuente: Rodríguez *et al.* (2015).

Este método consiste en someter el grafito a un raspado fino y luego extraer hojuelas extremadamente delgadas delaminando repetidamente el grafito con una cinta adhesiva. Para identificar las láminas de grafeno se utiliza espectroscopía óptica UV-vis, FT-IR y Raman, además de microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía de transmisión electrónica (TEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM). Aunque este método de exfoliación micromecánico se puede catalogar como rudimentario, se está escalando a nivel industrial mediante técnicas de transferencia de láminas delgadas tipo *roll to roll* (Revoredo, 2018).

2.2.2 Síntesis por método químico

Los métodos químicos para producir grafeno consisten en la exfoliación de cristales de grafito en solución usando oxidantes fuertes en medio ácido, para lo cual se siguen tres pasos: oxidación de grafito, exfoliación de óxido de grafito a óxido de grafeno y la reducción de óxido de grafeno (figura 2). Los métodos químicos tienen especial atención hoy en día debido a que son procesos alternativos y económicos para obtener grafeno, además de la interesante química de intercalación que desarrollan, la cual proporciona mayores oportunidades de obtener materiales híbridos (Martínez, 2015).

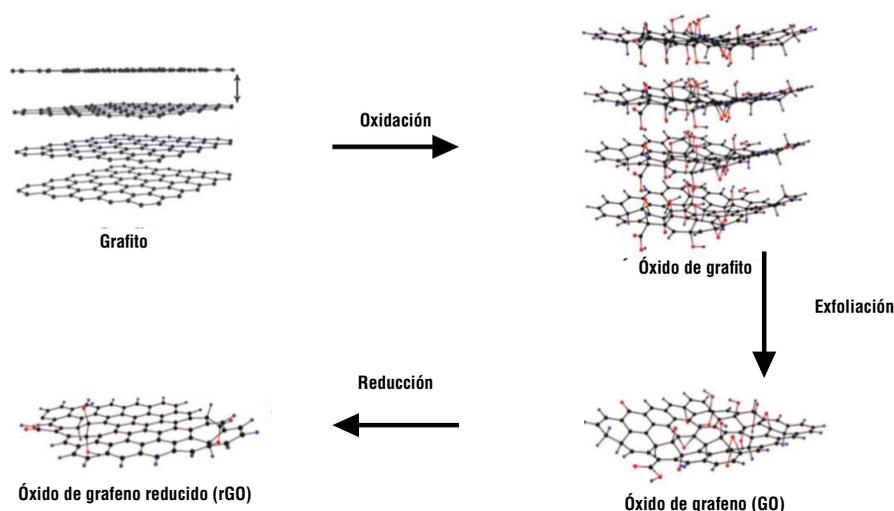


Figura 2. Sistema de obtención de grafeno por método químico.

Fuente: Farias *et al.* (2017).

2.3 Aplicaciones del grafeno

A continuación, se describen algunas de las múltiples aplicaciones de este tipo de tintas conductoras basadas en materiales nanoestructurados como el grafeno.

2.3.1 Biosensores

El grafeno se ha empleado para construir biosensores que permiten detectar antígenos y anticuerpos (figura 3), así como identificar biomoléculas como glucosa, dopamina, proteínas y ADN, las cuales son indispensables en los procesos moleculares de los seres vivos. Esta aplicación es posible gracias a que el grafeno es muy sensible y tiene una rápida respuesta en tiempo real cuando interactúa con las biomoléculas. Adicionalmente, es uno de los materiales más ampliamente investigados para aplicarlo como electrodo transparente en dispositivos electrónicos de nueva generación (Yang *et al.*, 2013).

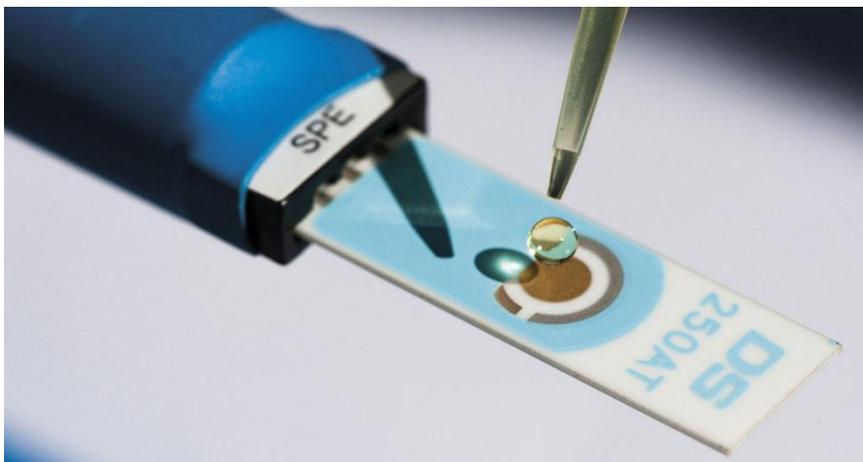


Figura 3. Electrodo usado en la concepción de dispositivos para detectar antígenos y anticuerpos. Fuente: Oliveira (2017).

2.3.2 Bioimágenes

El óxido de grafeno ha arrojado resultados positivos cuando se introducen moléculas fluorescentes a su estructura, lo cual ha permitido obtener información mediante imágenes térmicas *in vivo* de un modelo de ratón con cáncer de mama. Esta técnica de imagen se basa en la emisión de positrones (Foo & Gopinath, 2017).

El uso de estos biomarcadores es de vital importancia porque, al igual que los biosensores, sirven para diagnosticar enfermedades (Foo & Gopinath, 2017). El grafeno, el óxido de grafeno y el óxido de grafeno reducido están siendo usados por investigadores en la terapia fototérmica, ya que por ser un método no invasivo y controlado mediante la irradiación láser, genera una cantidad de calor considerable. En comparación con el grafeno y el óxido de grafeno, el óxido de grafeno reducido no solo presenta una alta eficiencia de conversión fototérmica —tiene una estabilidad térmica superior—, sino que además presenta la ventaja de que su superficie es modificable, lo cual permite realizar procesos exitosos de eliminación tumoral (figura 4) (Song *et al.*, 2020).

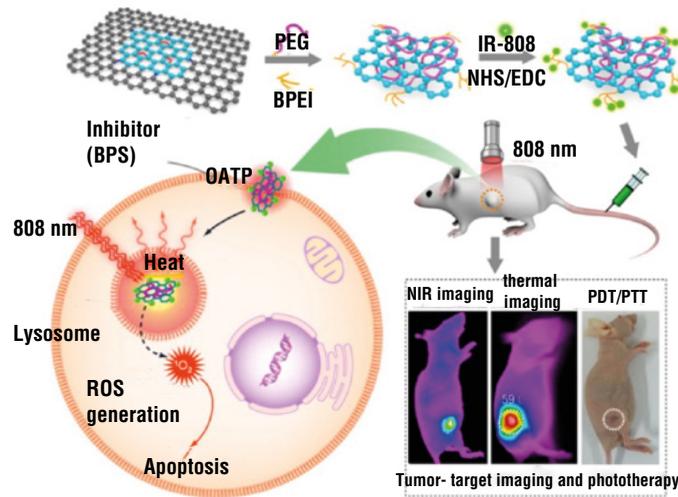


Figura 4. Ilustración esquemática de la preparación y la implementación de fototerapia sinérgica del cáncer.
Fuente: Song *et al.* (2020).

2.3.3 Suministro de drogas

La superficie del grafeno representa una ventaja para el suministro de drogas que lo convierte en un gran portador de fármacos en ambos lados de la hoja (figura 5). Se ha utilizado en el transporte de medicamentos anticancerosos dirigidos a estas células cancerígenas con el fin de no afectar ni destruir las células que están sanas (Foo & Gopinath, 2017).

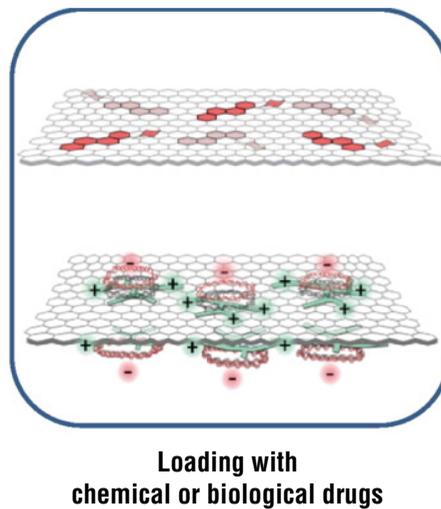


Figura 5. Método de transporte para fármacos y proteínas.
Fuente: Shim *et al.* (2016).

Se ha demostrado que, además de fármacos, el grafeno tiene una capacidad muy alta para cargar y transportar proteínas por medio de la fisorción en comparación con otros portadores. Cabe anotar que el éxito del transporte de la proteína siempre está primero en el estudio detallado de la proteína y en modificar su superficie para que puedan ser adaptados en la hoja de grafeno (Shim *et al.*, 2016).

2.3.4 Células madre

Otra de las aplicaciones del grafeno en la biomedicina es la estimulación y crecimiento de tejidos, en donde es necesario tener en cuenta la organización celular, su morfología, las propiedades eléctricas, el ambiente circundante, entre otros aspectos. Para trabajar con las células madre, se debe conocer qué factores intervienen en el proceso de generación de las señales bioquímicas. En este caso, el grafeno puede promover la unión de estas células madre, ya sean neurales, embrionarias, mesenquimales, etc. (Foo & Gopinath, 2017).

Los hallazgos investigativos en medicina regenerativa, curaciones de heridas e ingeniería de tejidos usando como base hidrogeles (figura 6) evidencian que estos materiales tienen propiedades viscoelásticas y de transporte, las cuales imitan los tejidos naturales. Las propiedades mecánicas del grafeno (alta elasticidad, resistencia y flexibilidad) y su capacidad de adaptar diversas funcionalidades en superficies planas han llevado a que sea utilizado como capa *buffer* para esta aplicación de ingeniería de tejidos (Sumit, 2014).

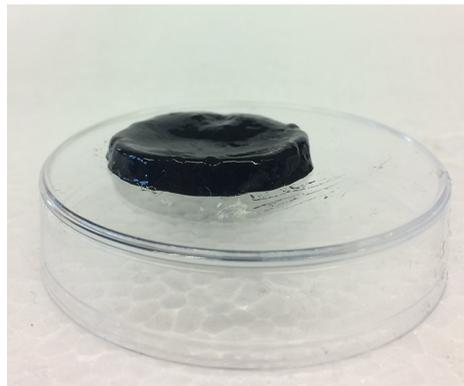


Figura 6. Hidrogel de almidón y grafeno dirigido a electrodos de implantes cerebrales.

Fuente: CicNetwork (2015).

3. Protocolo utilizado

El proceso de fabricación de las tintas en el proyecto de tesis se desarrolló en los laboratorios de nanotecnología de la Universidad Central con las condiciones que se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones ambientales en la fabricación de las tintas y dimensiones de grafito

Número de lote	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Dimensiones de las láminas de grafito (cm)
1 J	12	65	2 x 2
2 C	17	66	2 x 3
3 M	14	68	2 x 4
4 J-C	20	64	2 x 5
5 J-C-M	23	68	2 x 6
6 C-M	23	70	2 x 7
7 J-M	18	67	2 x 8
8 M-C-J	17	66	2 x 8
9 C-J	14	65	2 x 8
10 M-C-J	13	66	2 x 8

Fuente: elaboración propia.

1. A partir de una lámina de grafito, que varió de longitud (desde 2x2 cm hasta 2x8 cm) según el número de lote, se realizó la exfoliación electroquímica de láminas de grafeno en un medio ácido utilizando un electrodo de platino (figura 7).

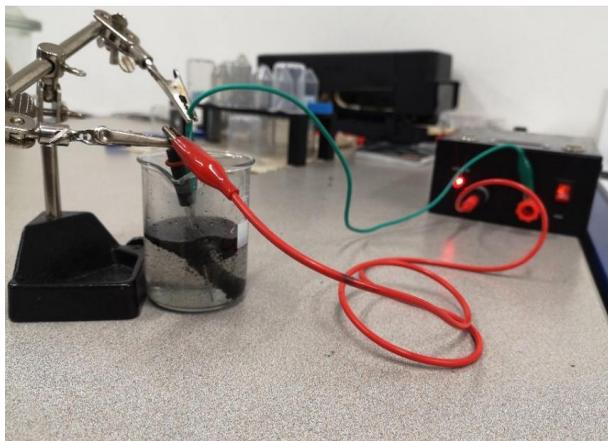


Figura 7. Sistema de exfoliación electroquímica de grafeno.

Fuente: elaboración propia.

2. La solución resultante se sometió al proceso de sonicación por un tiempo aproximado de 60 minutos en modo continuo (figura 8).



Figura 8. Sonicación de tinta.

Fuente: elaboración propia.

3. Con el fin de retirar el ácido de la tinta, se filtró mediante un filtro de papel cualitativo, haciendo una serie de lavados progresivos con agua destilada y dejando en el filtro el material exfoliado electroquímicamente (figura 9).

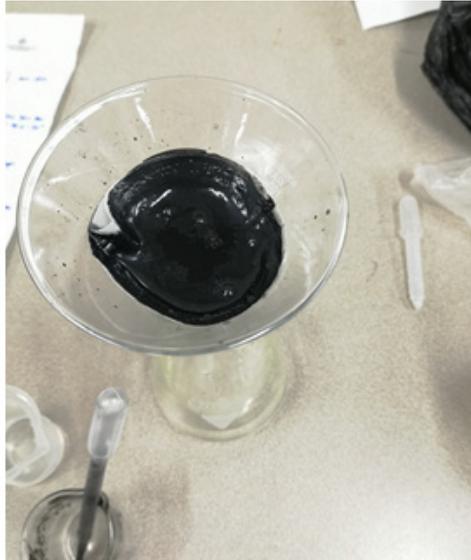


Figura 9. Filtrado de tinta.

Fuente: elaboración propia.

4. Luego de un tiempo de secado de 24 horas, se retiró el material resultante, el cual se mezcló con un solvente neutro en pH y de secado rápido (figura 10).

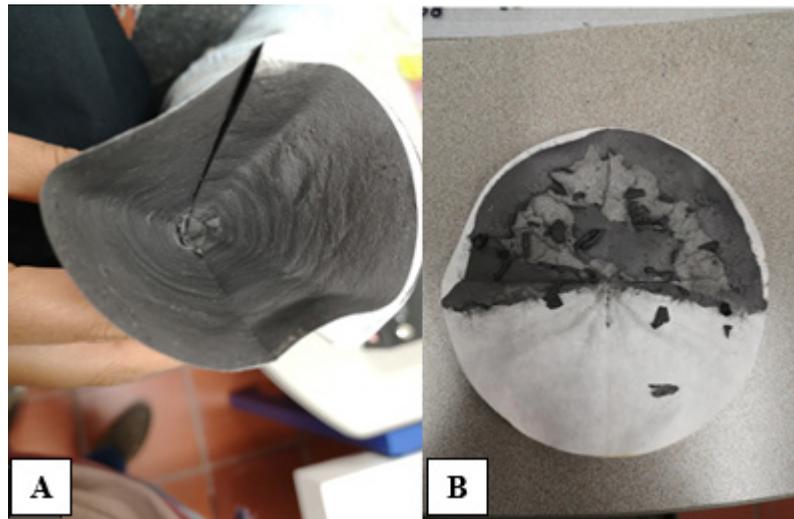


Figura 10. Material de carbono exfoliado después de eliminar el medio ácido y filtrado. (a) Grafeno en forma de hoja. (b) Grafeno en forma de grumos.
Fuente: elaboración propia.

5. La tinta con solvente neutro (agua filtrada) fue centrifugada y, posteriormente, se separó la tinta sobrenadante de los residuos que se depositaron en el fondo y en las paredes del recipiente (figura 11) con el fin de obtener una mezcla homogénea y estable.

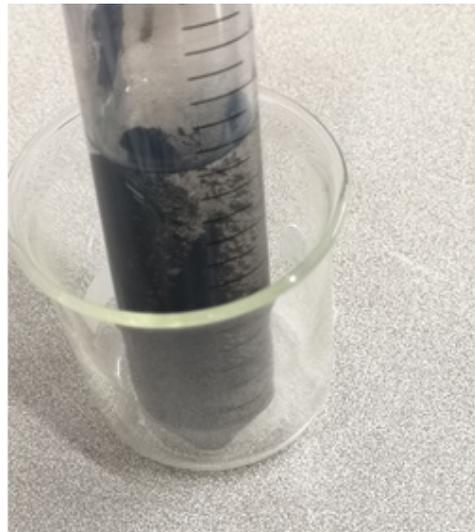


Figura 11. Tinta centrifugada y homogénea.
Fuente: elaboración propia.

4. Resultados

En este apartado se presentan los resultados de mayor relevancia del proyecto de tesis. A continuación, la tabla 2 sintetiza los resultados de las pruebas de continuidad eléctrica que se realizaron con la tinta obtenida.

Tabla 2. Comparación de resistencia de tintas en función de la distancia

Número de lote	Resistencia (Ω)	Distancia (cm)						
1 J	5000	3	11000	8	100000	10	250000	15
2 C	5000	3	9000	8	95000	10	127000	15
3 M	5000	3	6000	8	80000	10	95000	15
4 J-C	4500	3	5000	8	15500	10	50000	15
5 J-C-M	4000	3	2000	8	8000	10	10000	15
6 C-M	2000	3	200	8	4000	10	900	15
7 J-M	1000	3	150	8	500	10	700	15
8 M-C-J	700	3	30	8	300	10	500	15
9 C-J	500	3	15	8	100	10	300	15
10 M-C-J	450	3	5	8	40	10	90	15

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en las figuras 12 a 15, los valores de resistencia eléctrica son afectados directamente por las dimensiones de la lámina de grafito que es exfoliada al inicio del protocolo de fabricación. Los lotes de tintas nombrados como 7JM, 8MCJ, 9CJ y 10MCJ, al tener dimensiones de lámina de 2x8 cm, son los que menor resistencia ofrecen en función de las distancias, ya que la tinta posee mayor concentración de grafeno y sus propiedades se adhieren de forma más homogénea cuando son transferidas sobre el papel, que es un material rugoso.

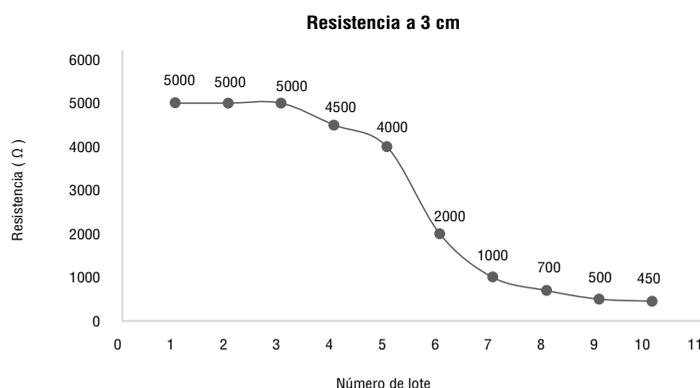


Figura 12. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 3 cm de distancia.

Fuente: elaboración propia.

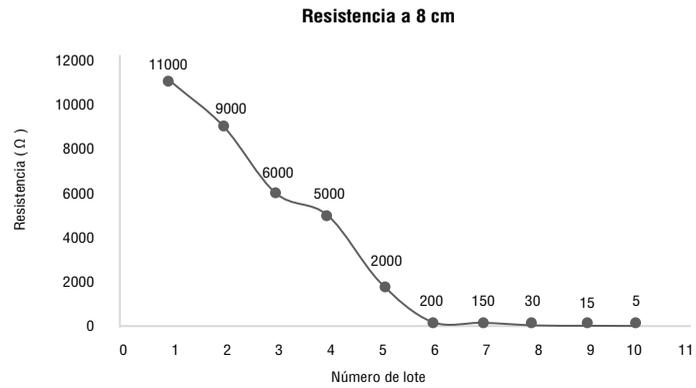


Figura 13. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 8 cm de distancia.
Fuente: elaboración propia.

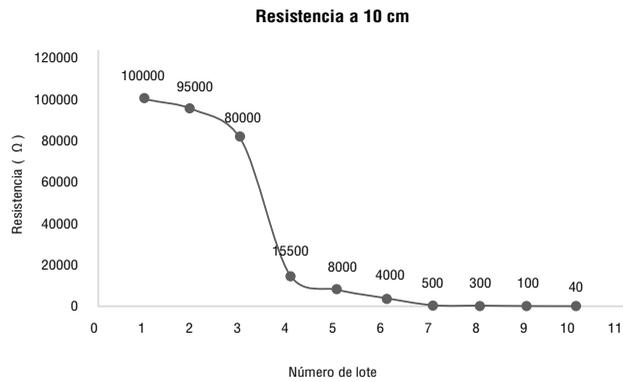


Figura 14. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 10 cm de distancia.
Fuente: elaboración propia.

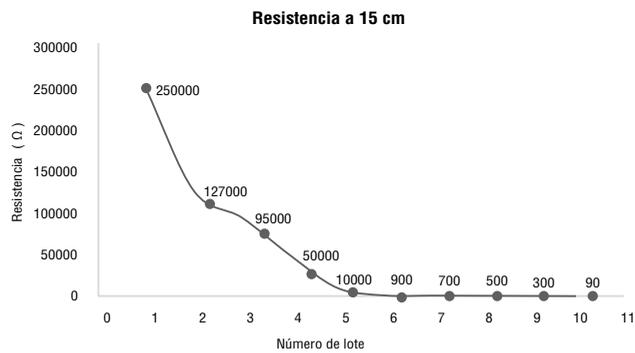


Figura 15. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 15 cm de distancia.
Fuente: elaboración propia.

Para verificar la presencia de láminas de grafeno en la muestra se enfoca un rayo láser a través. Si se visualiza la dispersión de la luz a través de la fase líquida (figura 16a), se puede inferir que hay láminas 2D del proceso de exfoliación electroquímica que permiten la dispersión de la luz. En la figura 16b se observa la reflexión interna generada en el sistema de tinta a base de grafeno.

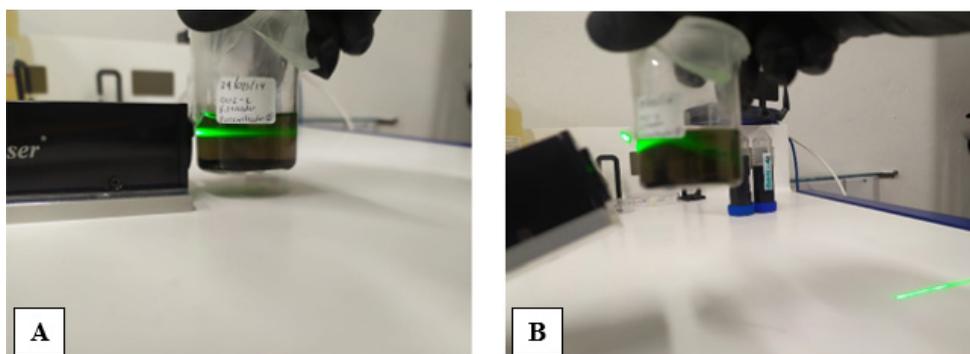


Figura 16. Pruebas de tinta de grafeno con láser (CrystaLaser CL532-005-L, longitud de onda 532 nm, potencia 5 mW). (a) Tinta de grafeno permitiendo la dispersión de luz a través de la tinta y (b) tinta de grafeno con reflexión interna.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 17 se muestra la comparación de tres tipos de tintas fabricadas. De derecha a izquierda: (a) agua Mili-Q, (b) tinta lote 5JCM y (c) tinta lote 10MCJ. Se puede observar que el haz láser describe una trayectoria apreciable en el lote 005-C en comparación con las otras dos, efecto que permite inferir que posee una mayor cantidad de láminas de grafeno vs. el primer lote. El agua Mili-Q dispersa la luz láser en menor proporción debido a algunas impurezas remanentes.

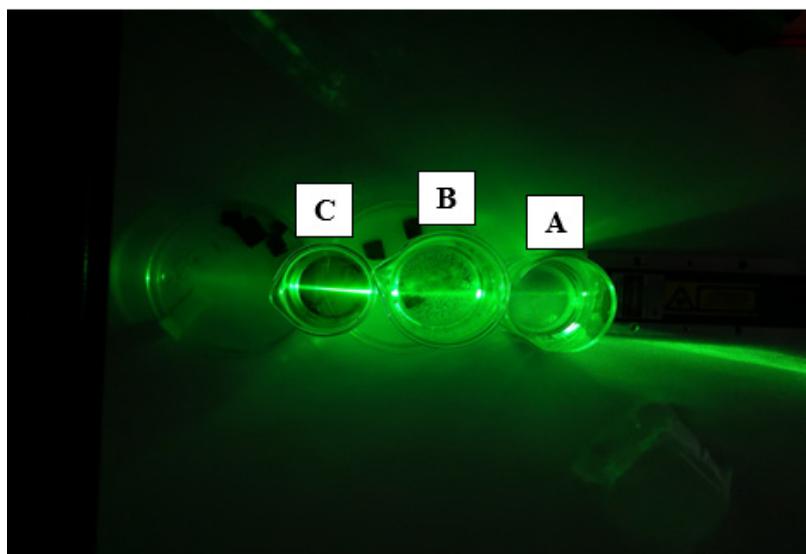


Figura 17. Comparación de fenómenos ópticos de dispersión de luz láser (CrystaLaser CL532-005-L, longitud de onda 532 nm, potencia 5 mW): (a) agua Mili-Q, (b) lote 001-J y (c) lote 005-C.

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Se concluye que es posible extraer grafeno por la vía de exfoliación electroquímica en condiciones de atmósfera abierta, pero su producción es de baja proporción y en tiempos que varían de 30 a 36 horas. Vale la pena resaltar que los costos por gramo obtenido son mucho menores que los del mercado, que oscilan los cincuenta dólares.

La comparación de los fenómenos ópticos de dispersión de luz láser (figura 16) evidencia que existen nanopartículas en el medio dispersante, lo cual demuestra la efectividad de los cambios que se realizaron en cada preparación, mediante los cuales se trató de encontrar siempre una alta concentración y calidad de las láminas en el proceso de exfoliación.

Al realizar la impresión sobre sustratos flexibles como el papel, la tinta diseñada arrojó valores de resistencia eléctrica baja ($8 \Omega/\text{cm}^2$). Posteriormente, cuando se realizaron pruebas utilizando un led y una batería, se pudo observar que el comportamiento de esta tinta se asemeja al de los conductores eléctricos.

Agradecimientos

El proyecto de investigación y el presente artículo se llevó a cabo empleando todos los conocimientos adquiridos durante la profundización de Nanomateriales y Aplicaciones Modernas y Nanoelectrónica Transparente y Flexible, impartida en el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central, con la dirección del profesor Mikel Hurtado.

Referencias

- Barros, M. Á. (2011). *El grafeno: entre serendipia, cinta adhesiva y emigrantes*. Universidad de las Américas.
- CicNetwork. (2015). Desarrollan un hidrogel de almidón y grafeno dirigido a electrodos de implantes cerebrales.
- Farías, L., Flores, J., Marín, L., & Sáenz, A. (2017). Grafeno, el material del futuro, síntesis y propiedades. *CienciAcierta*, 50. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/cc50/grafeno.pdf>
- Foo, M. E., & Gopinath, S. (2017). Feasibility of graphene in biomedical applications. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 94, 354–361. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.07.122>
- González Iglesias, M. A. (2017). *Grafeno, innovación, derecho y economía*. J. B Bosh.
- Martínez, R. (2015). *Funcionalización del óxido de grafeno con nanopartículas de paladio y sus aplicaciones en la detección de hidrógeno* [tesis de doctorado, Instituto Potosino de Investigación]. Repositorio Institucional Instituto Potosino de Investigación. <https://bit.ly/3uvyGwS>
- Méndez-Rossal, H., & Wallner, G. M. (2019). Printability and properties of conductive inks on primer-coated surfaces. *International Journal of Polymer Science*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/3874181>

- Oliveira Andrade, R. d. (2017). Biosensores en la medicina. *Pesquisa*, 258. <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/biosensores-en-medicina/>
- Revoredo, T. G., & Pachamango Bautista, T. G. (2018). Propiedades del grafeno y sus aplicaciones en el campo energético. *Campus*, 23(26), 187-198
- Rodríguez, C., Quemada, M., Ruiz, G., Vega, S., & Alcaraz, L. (2015). Prototipo de laminadora de películas de óxido de grafeno. *Pistas Educativas*, 113. <https://bit.ly/2R8c57v>
- Shim, G., Kim, M., Park, J., & Oh, Y. (2016). Graphene-based nanosheets for delivery of chemotherapeutics and biological drugs. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 105 Pt B, 205-227. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.004>
- Song, S., Shen, H., Wang, Y., Chu, X., Xie, J., Zhou, N., & Shen, J. (2020). Biomedical application of graphene: from drug delivery, tumor therapy, to theranostics, colloids and surfaces B. *Biointerfaces*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110596>
- Sumit Goenka, V. S. (2014). Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Controlled Release*, 173, 75-88.
- Yang, Y., Asiri, A. M., Tang, Z., Du, D., & Lin, Y. (2013). Graphene based materials for biomedical applications. *Materials Today*, 16(10), 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.09.004>