



Artículo de investigación

Síntesis de nanotubos de carbono multipared a partir de precursores naturales mediante nebulización pirolítica modificada

Synthesis of multi-walled carbon nanotubes from natural precursors via modified pyrolytic nebulization

Isis Alejandra Hernández Rivera¹ , Rocío Alejandra Cera García² , Víctor Raúl López López³ ,
Luis Ernesto Solís Delgado² , Balter Trujillo Navarrete¹ , Francisco Paraguay Delgado⁴ , Yadira
Gochi Ponce^{1*} 

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial s/n col. Mesa de Otay, 22500, Tijuana BC, México.

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Departamento de Química y Bioquímica, Calz. del Tecnológico 12950. Tomas Aquino, 22414, Tijuana B.C., México.

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Departamento de Ingeniería Aeronáutica, Calz. del Tecnológico 12950. Tomas Aquino, 22414, Tijuana B.C., México.

⁴Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.

Av. Miguel de Cervantes Saavedra 120. Complejo industrial Chihuahua, 31136, Chihuahua, Chihuahua, México.

Autor de correspondencia: Isis Alejandra Hernández Rivera, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial s/n col. Mesa de Otay, 22500, Tijuana, Baja California, México. Correo electrónico: isis.hernandez193@tectijuana.edu.mx. ORCID: 0009-0005-2742-5580.

Recibido: 21 de abril del 2026

Aceptado: 11 de julio 2026

Publicado: 27 de agosto del 2026

Resumen.- Este estudio investiga la implementación de un enfoque de síntesis verde basado en un método de pirólisis por pulverización modificado, con el objetivo de desarrollar un proceso más sostenible ambientalmente mediante la sustitución de precursores convencionales derivados de hidrocarburos por compuestos naturales extraídos de aceites esenciales de plantas. Se seleccionaron tres fuentes de precursores renovables diferentes, obtenidas por destilación por vapor y posteriormente purificadas mediante evaporación rotatoria utilizando diclorometano como disolvente de extracción. Se sintetizaron cuatro muestras de nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT), denominadas RON, CLN, CNN y CNT. La muestra de CNT se produjo utilizando un precursor orgánico comercial convencional y sirvió como material de referencia. Todas las muestras se sintetizaron bajo condiciones experimentales idénticas, incluyendo temperatura de reacción, gas portador, caudal de gas, presión, velocidad de alimentación de la solución, tiempo de reacción y tipo de sustrato. Se realizó un estudio comparativo para evaluar las propiedades de los MWCNT sintetizados. Los nanomateriales se caracterizaron mediante análisis termogravimétrico (TGA), microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM) y espectroscopia Raman. Estas técnicas de caracterización se emplearon para evaluar sus propiedades morfológicas, térmicas, estructurales y de estabilidad química. Los resultados confirmaron la formación exitosa de MWCNT a partir de todos los precursores naturales (RON, CLN y CNN). Los materiales sintetizados exhibieron morfologías distintas y rendimientos de producción variables. En general, los MWCNT derivados de aceites esenciales mostraron un menor grado de cristalinidad en comparación con la muestra de CNT sintetizada a partir de tolueno. Sin embargo, sus características estructurales y térmicas demuestran que los aceites esenciales constituyen fuentes de carbono alternativas viables y sostenibles para la producción de nanotubos de carbono mediante pirólisis por pulverización modificada. Este trabajo presenta una investigación experimental y comparativa centrada en la síntesis de MWCNT a partir de tres precursores naturales diferentes y la evaluación de sus propiedades morfológicas, térmicas y estructurales en relación con los nanotubos producidos a partir de un precursor de hidrocarburo convencional. Las evaluaciones de biocompatibilidad estaban fuera del alcance del presente estudio y, por lo tanto, no se consideraron.

Palabras clave: Síntesis verde; Nanotubos de carbono de paredes múltiples; Precursores naturales; Nebulización pirolítica modificada.

Abstract.- This study investigates the implementation of a green synthesis approach based on a modified spray pyrolysis method, aimed at developing a more environmentally sustainable process through the replacement of conventional hydrocarbon-derived precursors with naturally occurring compounds extracted from plant essential oils. Three different renewable precursor sources were selected, obtained by steam distillation and subsequently purified through rotary evaporation using dichloromethane as the extraction solvent. Four samples of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), designated as RON, CLN, CNN, and CNT, were synthesized. The CNT sample was produced using a conventional commercial organic precursor and served as the reference material. All samples were synthesized under identical experimental conditions, including reaction temperature, carrier gas, gas flow rate, pressure, solution feed rate, reaction time, and substrate type. A comparative study was conducted to evaluate the properties of the synthesized MWCNTs. The nanomaterials were characterized using thermogravimetric analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and Raman spectroscopy. These characterization techniques were employed to assess their morphological, thermal, structural, and chemical stability properties. The results confirmed the successful formation of MWCNTs from all natural precursors (RON, CLN, and CNN). The synthesized materials exhibited distinct morphologies and varying production yields. In general, the MWCNTs derived from essential oils displayed a lower degree of crystallinity compared to the CNT sample synthesized from toluene. Nevertheless, their structural and thermal characteristics demonstrate that essential oils constitute viable and sustainable alternative carbon sources for the production of carbon nanotubes through modified spray pyrolysis. This work presents an experimental and comparative investigation focused on the synthesis of MWCNTs from three different natural precursors and the evaluation of their morphological, thermal, and structural properties relative to nanotubes produced from a conventional hydrocarbon precursor. Biocompatibility assessments were beyond the scope of the present study and were therefore not considered.

Keywords: Green synthesis; Multi-walled carbon nanotubes; Natural precursors; Modified pyrolytic nebulization.



1. Introducción

Los nanotubos de Carbono son alótropos de carbono, como el diamante, el grafito, el grafeno o los fullerenos. Cuentan con múltiples propiedades para aplicaciones biológicas, actividad antibacteriana, transportadores de fármacos, y recientemente en ingeniería biomédica, debido a propiedades estructurales y eléctricas únicas e inusuales. Existen diferentes tipos de nanotubos de carbono en función de las capas de grafito que los forman, estos pueden ser nanotubos de carbono de pared sencilla y nanotubos de carbono de pared múltiple (SWCNT y MWCNT, por sus siglas en inglés) que pueden considerarse como capas de láminas de grafito enrolladas concéntricamente donde cada átomo de carbono está unido con otros tres mediante hibridación sp^2 , en el desarrollo de este trabajo se utilizan nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) [1].

Desde su descubrimiento han impulsado el campo de la nanotecnología, numerosos investigadores han trabajado en aplicaciones basadas en nanomateriales, y los nanotubos de carbono han atraído un gran interés tanto en la comunidad científica como en la industria. El mayor desafío que enfrentan estos nanomateriales es la toxicidad registrada en estudios realizados, esto principalmente por sus características químicas y físicas. Se ha mostrado que la biocompatibilidad sigue la tendencia $MWCNT < SWCNT$, siendo los nanotubos multipared, menos tóxicos. En estos estudios se pudo observar que MWCNT sin funcionalizar, con una relación de aspecto alta, hidrófobos y con impurezas metálicas inducen hepatotoxicidad significativa en ratones, en su mayoría debido a los metales catalíticos usados durante la síntesis como, Fe, Ni, Mo y Co [2].

A pesar del uso de MWCNT en diversas aplicaciones, la toxicidad sigue siendo una barrera importante que requiere mayor investigación, relacionado a la toxicidad de estos materiales se habla de su pequeño tamaño, con una gran superficie por unidad de volumen y cómo influye esto considerablemente en la toxicidad. Además de la superficie de los MWCNT se discuten factores fisicoquímicos, como impurezas metálicas que no son deseables. Existe cierta evidencia sobre cómo los residuos de catalizadores metálicos también contribuyen a estos efectos, el tamaño, la longitud y el diámetro, también son aspectos relevantes, los MWCNT pequeños pueden penetrar fácilmente la membrana celular en comparación con los más grandes, así como los agentes solubilizantes, la funcionalización y aglomeración de los MWCNT, que pueden provocar estrés oxidativo y vías de señalización tóxica. [3]

Los métodos de síntesis de nanotubos de carbono se dividen principalmente en tres métodos: método de descarga por arco, método de evaporación láser y método de deposición química de vapor. En el proceso de síntesis, los componentes principales son una fuente de carbono, sólida, líquida o gaseosa, un catalizador metálico, un sustrato y control de la temperatura durante el proceso de síntesis, son variables de control importantes.

El método inicia con la inserción de un hidrocarburo (precursor) en un reactor de cuarzo que se encuentra a una temperatura usualmente superior a los 500 °C. En la parte interior del reactor se encuentra un sustrato que sostiene al material catalizador y sobre el cual crecen los nanotubos de carbono. La temperatura del reactor y el flujo constante del hidrocarburo estimulan la disociación de las moléculas de carbono y generan el ambiente propicio para la deposición del carbono sobre las partículas catalizadoras. Los precursores comúnmente utilizados son etileno, acetileno o metano. El interior del reactor es previamente purgado con Argón (u otro gas inerte) para evitar la formación de monóxidos o dióxidos de carbono [4].

En los últimos años, otra vertiente se ha popularizado en la obtención de MWCNT, aplicando ingeniería verde para la modificación del proceso de síntesis, sustituyendo el uso de hidrocarburos



como fuentes de carbono por el uso de aceites esenciales, haciendo el proceso más amigable con el ambiente y explorando nuevas propiedades de nuevos materiales resultantes. El requerimiento de nuevos materiales en los procesos actuales de fabricación, surge también de la búsqueda de optimización en el funcionamiento de los productos, en el proceso de obtención, en la reducción de costos o en mejoras de las propiedades del material, como lo es la biocompatibilidad en los MWCNT [5].

En este contexto, en el desarrollo de este proyecto, el método utilizado para la síntesis es nebulización pirolítica modificada, el cual es una variante del método de depósito químico de vapor (CVD), es un método seleccionado por su versatilidad, accesibilidad y precisión al ajustar parámetros claves en el proceso de síntesis, implicando analizar y adecuar algunas variables dando paso a la obtención de MWCNT.

Tradicionalmente la materia prima que se utiliza para la producción de nanotubos de carbono son precursores relacionados con combustibles fósiles, que pueden no estar suficientemente disponibles en un futuro próximo; por lo tanto, en el desarrollo de un material de carbono más competitivo, es necesario considerar aspectos de sustentabilidad para el desarrollo de materiales carbonosos a partir de precursores naturales. Los principales factores de la utilización de una fuente a base de plantas es la característica sustentable, ya que actúa como materia prima económica y renovable para la producción de MWCNT a gran escala [6].

En la literatura existen precedentes de la implementación de precursores naturales vegetales en la síntesis de CNT, en el estudio hecho por Kumar [7], se informa sobre el uso de varios precursores de hidrocarburos vegetales, como lo son el aceite de *Pinus pinaster* (trementina), aceite de *Elaeis oleifera* (palma), *Eucalyptus globulus* (eucalipto), entre otros. La investigación sobre precursores de hidrocarburos naturales y materiales de desecho ha aumentado en los últimos años, ya que prometen producir nanoestructuras de mejor calidad y en grandes cantidades. Demostrando ser una alternativa viable en la obtención de MWCNT.

El presente trabajo tiene un alcance comparativo y experimental, implementando la síntesis verde únicamente en la obtención de los MWCNT, utilizando tres diferentes fuentes de carbono naturales (aceites esenciales), por nebulización pirolítica modificada, bajo un proceso controlado, posteriormente caracterizando los materiales por medio de Análisis termogravimétrico (TGA), Microscopía de barrido (SEM), Microscopía electrónica de transmisión (TEM) y Espectroscopia Raman, limitándose a la evaluación de las propiedades morfológicas y estructurales, para el análisis de las propiedades fisicoquímicas y la recopilación de datos obtenidos, en contraparte a MWCNT sintetizados a partir de un precursor convencional de hidrocarburo (Tolueno), sin considerar en este estudio evaluaciones de biocompatibilidad mediante ensayos *in vitro*, como ya se ha reportado recientemente con MWCNT prístinos y de precursores tradicionales [8].

2. Antecedentes

En la actualidad diversos estudios han reportado la síntesis de MWCNT por Depósito Químico de Vapor (CVD) utilizando diversos precursores naturales (aceites esenciales vegetales), los compuestos orgánicos que contienen oxígeno pueden utilizarse reemplazando a los hidrocarburos, como una alternativa sostenible. En el trabajo realizado por Hamid [9], se reporta el uso de precursores a base de aceites de *Cocos Nucifera* (Coco) y *Olea europaea L.* (Olivo), sintetizados por el método CVD, el material obtenido fue caracterizado por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía



Electrónica de Transmisión (TEM), Espectroscopía Raman y Espectroscopia de Fotoelectrones de Rayos X (XPS), confirmando la formación de MWCNT.

Tradicionalmente en la síntesis de MWCNT se implementa el uso de precursores de hidrocarburos fósiles, gracias a los buenos resultados obtenidos en diversos artículos, no obstante, estas fuentes de precursores resultan caros y pueden obtenerse bajo demanda pagando un alto costo en el mercado [10, 11]. Por el contrario, los precursores de hidrocarburos naturales por ejemplo aceite de *Cinnamomum camphora* (alcanfor) $C_{10}H_{16}O$, *Pinus pinaster* (trementina) $C_{10}H_{16}$, eucalipto $C_{10}H_{18}O$, *Azadirachta indica* (neem) y *Sesamum indicum* (sésamo) están fácilmente disponibles en mayor abundancia, a un costo muy bajo en comparación con los precursores de hidrocarburos fósiles, siendo una fuente de carbono más barata y altamente eficiente para la síntesis de MWCNT. Estos precursores naturales producen un alto rendimiento de MWCNT alineados en comparación con los hidrocarburos fósiles [12-15], resaltando que estos componentes pueden encontrarse en otros diferentes aceites esenciales vegetales, abriendo la posibilidad a la obtención de nuevos precursores naturales para la síntesis de MWCNT.

Si bien en el estado del arte de la síntesis verde se han obtenido MWCNT a base de diferentes aceites esenciales vegetales como precursores, aún existe un amplio panorama de opciones a probar para la implementación de precursores en la síntesis de MWCNT, así como el estudio de las características fisicoquímicas de los productos resultantes. En la elaboración de este proyecto se utilizaron tres fuentes vegetales para la extracción de MWCNT, *Citrus x Limon* (Limón), *Rosmarinus Officinalis L.* (Romero) y *Cocos Nucifera* (Coco).

2.1 MWCNT - *Cocos Nucifera*

El uso aceite esencial de *cocos nucifera* como precursor se ha demostrado exitoso para la síntesis de MWCNT, gracias a su composición química, donde destacan los ácidos grasos, en específico ácido láurico, estas cadenas largas hidrocarbonadas proporcionan una alta estabilidad química. Durante el proceso de síntesis a altas temperaturas, los compuestos orgánicos del aceite se descomponen y liberan átomos de carbono que se depositan sobre partículas de catalizadores metálicos, promoviendo la nucleación y el crecimiento de estructuras nanométricas [16].

Los resultados muestran que el uso de aceite de coco permite la formación de estructuras de carbono como MWCNT. Sin embargo, debido a su alto contenido de cadenas saturadas, el aceite de coco tiende a producir materiales con mayor cantidad de defectos estructurales y menor grado de grafitización en comparación con otros precursores orgánicos más insaturados. Esto se atribuye principalmente a su alto contenido de ácidos grasos saturados (90–91 %), lo cual reduce la reactividad del precursor durante la descomposición térmica.

A pesar de estas limitaciones, el aceite de coco demuestra que los aceites vegetales pueden emplearse como fuentes renovables de carbono, lo que representa una alternativa sostenible para la producción de CNT. Sin embargo, su eficiencia depende de la composición química del aceite, particularmente del contenido de hidrocarburos insaturados [17-18].

2.2 MWCNT - *Rosmarinus Officinalis L.*

En el trabajo presentado por Jiang, Y., y colaboradores [19], se analizó la composición del aceite esencial de romero mediante una técnica acoplada, cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS). Se identificaron 22 componentes, que constituyen el 97,41% del aceite. Los principales constituyentes fueron 1,8-cineol (26,54%), β -pineno (20,14%) y alcanfor (12,88%), componentes también encontrados en aceites esenciales (trementina, eucalipto y alcanfor) que han sido utilizados



exitosamente como precursores en la síntesis de MWCNT. El aceite mostró una actividad antibacteriana y antifúngica más pronunciada frente a diferentes microorganismos analizados que el 1,8-cineol y el β -pineno por separado. Por lo que resulta interesante ver el comportamiento de este aceite vegetal como precursor en la síntesis de MWCNT.

La síntesis verde de MWCNT con aceite esencial de Alcanfor como fuente de carbono ha sido reportada por Nazirah [20], en este trabajo depositaron MWCNT sobre una oblea de silicio mediante CVD con flujo de gas argón. Se obtuvieron nanomateriales con picos atribuidos a los modos de vibración de los mismos, esta información es mostrada mediante caracterización de espectroscopía infrarroja (FTIR).

El aceite esencial de alcanfor como precursor además de ser muy económico, es fácil de usar para la pirólisis debido a su naturaleza volátil. Se sublima a temperatura ambiente, debido a su estructura molecular típica, compuesta por anillos de carbono hexagonales y pentagonales, posee una tendencia inherente a formar fullerenos y nanotubos, al igual que puede obtenerse alto rendimiento de MWCNT alineados de alta pureza a partir de este precursor $C_{10}H_{16}O$. Posee cilindros de carbono casi unidimensionales, orientados paralelamente y perpendicularmente a un sustrato, permiten investigar sus propiedades macroscópicas para futuras aplicaciones tecnológicas [21].

En estudios más recientes se ha utilizado *Rosmarinus Officinalis L.* (Romero) como factor adicional para un posterior tratamiento de funcionalización de MWCNT, en el estudio elaborado por Flores (2026). Se realizó la HPLC-MS para verificar los compuestos presentes en el extracto de romero, en la cual se identificó ácido rosmarínico ácido feruloiltartárico y rosmanol. Similar a lo reportado por otros autores como, Amaral et al., quienes realizaron una extracción Soxhlet convencional con hojas secas de romero, utilizando un disolvente de etanol, y encontraron la presencia de ácido rosmarínico, ácido oleanólico, ácido cafeico y quercetina, en el principal artículo mencionado se utilizaron MWCNT comerciales adquiridos de Sigma-Aldrich (pureza >90%, diámetro externo promedio de 9,5 nm, longitud aproximada de 1,5 μ m), método de síntesis no especificado. Se funcionalizaron usando etanol 96%, hojas secas de *Rosmarinus officinalis L.* (romero) y baño ultrasónico. Finalmente, por ensayos MTT se evidenció que la viabilidad celular de los MWCNT funcionalizados con Romero aumenta en un 14% y evidenció la ausencia de citotoxicidad sugiriendo una potencial aplicación en biomedicina. El resultado de la interacción de MWCNT y *Rosmarinus officinalis L.* representa un material de interés en el desarrollo de este trabajo [22,23].

2.3 MWCNT - *Citrus x Limón*

Los cítricos son uno de los principales cultivos frutales en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Contienen entre un 85 y un 99 % de componentes volátiles y entre un 1 y un 15 % de componentes no volátiles y su contenido, así como su composición química, dependen de la especie y los métodos de extracción. Estos constituyentes volátiles contienen grandes cantidades de hidrocarburos monoterpénicos (70-95 %) y *d*-limoneno, una buena fuente de antioxidantes. El perfil químico del aceite esencial de *Citrus x limón obtenido* mediante cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas (GC-MS) reveló que el limoneno (60,7 %), el β -pineno (12,6 %) y el γ -terpineno (10,3 %) son componentes comunes en dicho aceite, estos componentes han sido reportados con anterioridad como efectivos precursores en la síntesis verde de MWCNT, por lo que esta fuente vegetal cumple con el criterio de composición para ser un precursor en la síntesis de MWCNT [24-26].

A pesar de los antecedentes presentados, no existe la suficiente documentación del uso de aceites esenciales extraídos de *Citrus x Limón* (Limón), *Rosmarinus Officinalis L.* (Romero) y *Cocus nucifera*



(Coco), como precursores en la síntesis de MWCNT. Por ello, en este trabajo se presenta la síntesis de MWCNT con los extractos vegetales de las dos especies ya mencionadas como precursores, obtenidos por destilación y purificación por evaporación rotatoria, para sintetizar MWCNT por nebulización pirolítica modificada para el estudio de las propiedades de estos materiales.

3. Metodología

3.1 Materiales

En esta investigación se sintetizaron MWCNT mediante la técnica nebulización pirolítica modificada, haciendo uso de aceites esenciales vegetales como precursores de la síntesis, estos aceites fueron obtenidos por destilación (arrastre de vapor) y purificados por evaporación rotatoria. El ferroceno $C_{10}H_{10}Fe$ (98%), tolueno $C_6H_5CH_3$ (99.5%) y diclorometano CH_2Cl_2 fueron adquiridos de Sigma Aldrich.

3.2 Extracción y purificación de aceites esenciales

La extracción de aceites esenciales de *Rosmarinus Officinalis* L. (Romero), *Citrus x Limón* (limón Eureka) y *Cocos Nucifera* (Coco) fue realizada mediante un sistema de destilación, usando un condensador con reflujo de 6.5-7 in, matraz Erlenmeyer 2 L con la materia prima vegetal para el aceite esencial, matraz bolo de 1 L con agua destilada sobre una manta de calentamiento a 380- 450 °C. No se descarta la realización de análisis estadísticos y repeticiones experimentales para ayudar a la reproducibilidad de nuestro trabajo.



Figura 1. Sistema de destilación para extracción de precursores.

El proceso de purificación de aceites se realiza por evaporación rotatoria haciendo uso de un rotavapor Yamato, Water bath BM100, a una temperatura de 80-100 °C, en una solución de aceite-solvente 1:1, usando como solvente diclorometano (CH_2Cl_2). No se realizó caracterización química de los precursores obtenidos previo a su uso, no descartamos realizar estudios de caracterización para complementar la parte experimental de nuestro proyecto.



Figura 2. Equipo para purificación mediante evaporación rotatoria de precursores, Yamato BM100.

3.4 Síntesis de MWCNT

Se implementó un sistema de síntesis bajo atmósfera inerte para el proceso de obtención de MWCNT, usando como referencia la metodología reportada por Paz et al., (2026). Este sistema se coloca dentro de una campana de extracción para absorber los gases resultantes del proceso de síntesis [27].

Se introdujo un tubo de cuarzo (reactor) a un horno cilíndrico modelo Lindberg Blue M, equipado con un control de temperatura. El reactor se conectó a un nebulizador Agilent Technologies One Neb que se usó para obtener una niebla de pequeñas gotas de la fuente de carbono/catalizador (tolueno/ferroceno y precursor natural/ferroceno). Para la atmósfera inerte se usó argón de alta pureza (99.99% Infra) como gas portador para generar la niebla de fuente de carbono/catalizador en el nebulizador.

El nebulizador se conectó a una bomba peristáltica perimax marca Espetec con un flujo de 10 mL/h por donde se nebulizó en el tubo de cuarzo durante 20 min, obteniendo un sistema de síntesis como puede observarse en la Figura 3. Del lado derecho del horno se encuentra el sistema de nebulización para el reactor (nebulizador, entrada de solución, bomba peristáltica, gas acarreador y regulador de presión de gas). A la izquierda del horno puede observarse la salida de gases del sistema.



Figura 3. Sistema de síntesis para obtención de MWCNT por nebulización pirolítica modificada.



Para la síntesis de MWCNT con precursores naturales, se utilizaron 6 ml precursor (Figura 4A) y 112 mg de catalizador (ferroceno). Se obtuvieron tres lotes de MWCNT, etiquetados como RON (*Rosmarinus Officinalis L.*), CLN (*Citrus x Limon*) y CNN (*Cocos Nucifera*).

En una segunda síntesis para MWCNT con precursor tradicional (Tolueno) se utilizaron 10 ml del precursor (Figura 4B) y 222 mg de catalizador (ferroceno). En ambos procesos se usó argón como gas portador y el flujo fue regulado por un controlador de flujo másico.

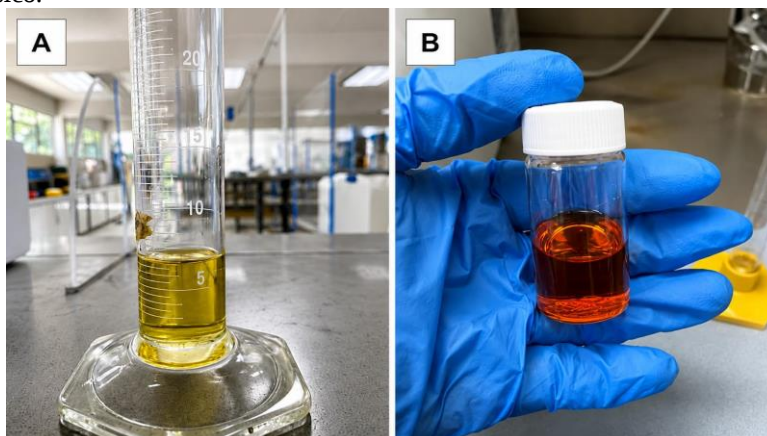


Figura 4. A) Precursor natural a base de aceite esencial de *Rosmarinus Officinalis L.* (Romero), *Citrus x Limón* (limón Eureka) y *Cocos Nucifera* (Coco), B) Precursor de hidrocarburo (Tolueno).

Una vez que la temperatura en el horno se mantuvo estable a 900 °C, el argón se alimentó al nebulizador y la mezcla de fuente de carbono/catalizador se introdujo en el tubo de cuarzo sin calentamiento previo (Figura 5). Las dimensiones totales de los tubos de cuarzo utilizados como reactor tienen un diámetro interno de 7 mm, diámetro externo de 9 mm y una longitud de 62 cm aproximadamente. La salida de gas del tubo de cuarzo se hizo pasar por una trampa para gases para cuidar las emisiones hacia la atmósfera.



Figura 5. Entrada de solución precursora al reactor (tubo de cuarzo) para síntesis de MWCNT por nebulización pirolítica modificada.

Una vez que el tubo de cuarzo se expuso a la pirólisis por aspersión, el horno se enfrió bajo un flujo de argón a temperatura ambiente. Posteriormente, la película negra hecha de MWCNT formados en la



superficie interna del cuarzo, se eliminó manualmente con una espátula de acero inoxidable. No se realizó ningún tratamiento de purificación o funcionalización a los MWCNT posterior a la síntesis, debido a que el interés en el grupo de trabajo es estudiar primeramente los MWCNT prístinos.

3.5 Caracterización de MWCNT

Se realizaron diferentes caracterizaciones de los productos obtenidos en el proceso de síntesis, se caracterizó con Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para analizar la estructura de los materiales sintetizados, se dispuso del equipo SEM, marca TESCAN-VEGA3 de 14 kV.

Las caracterizaciones por TEM fueron realizadas usando un microscopio JEM2200FS a 200 kV, en donde se realizó Difracción de Electrones de Área Seleccionada (SAED) y Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersa (EDS).

Se realizó análisis termogravimétrico (TGA), con un equipo TGA Instrument 2960, usando un crisol de alúmina para analizar la estabilidad térmica de los materiales sintetizados a una rampa de calentamiento de $20\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, en una atmósfera de aire y con un intervalo de temperatura de 0 - 800 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 6).

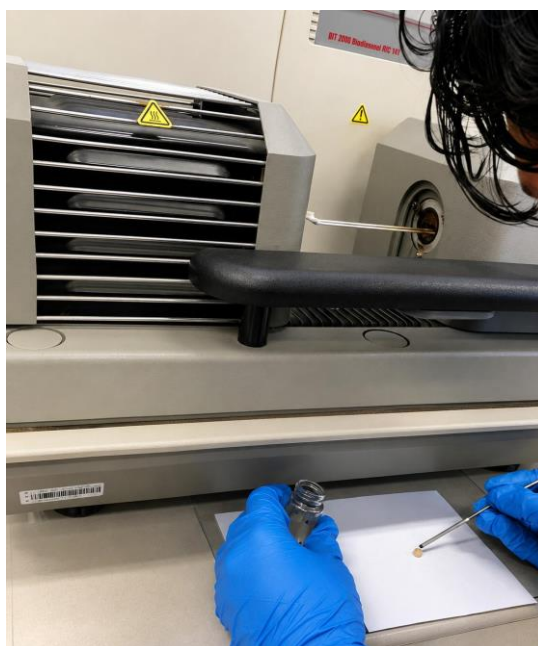


Figura 6. Análisis por TGA de MWCNT lote RON, CNN, CLN y CNT.

Se realizaron análisis por espectroscopía Raman, con un equipo Raman Thermo Scientific-DXR Smart, con una potencia de láser $70\text{ }\mu\text{W}$ / He-Ne 780 nm, para establecer criterios cuantitativos que nos resultan útiles para determinar el orden de las unidades estructurales, así como también el número de defectos presentes en las síntesis.

4. Resultados y discusiones

4.1 Productos de síntesis MWCNT

En esta sección se analizarán los resultados del proyecto, iniciando con las síntesis de MWCNT, seguido de las caracterizaciones de cada experimento.



Se sintetizaron cuatro lotes de MWCNT, un lote por cada uno de los tres precursores naturales (aceites esenciales vegetales) y uno adicional usando un precursor orgánico comercial tradicional (tolueno), manteniendo las mismas condiciones experimentales (temperatura, tiempo de reacción, flujo de gas acarreador, flujo de solución precursora y sustrato de reactor). La Tabla 1 muestra los resultados para cada una de las síntesis, el nombre correspondiente al lote según el precursor, seguido de la cantidad en mg de catalizador utilizado en la síntesis (122 mg para precursores de origen vegetal y 222 mg para precursor de hidrocarburo, Tolueno), la fuente de carbón corresponde al precursor en ml (6 mL para precursores de origen vegetal y 10 mL para precursor de Tolueno), de igual forma se registra la molaridad de cada solución y el tiempo de reacción de la síntesis. Finalmente podemos observar que el precursor natural con el que se obtuvo una mayor cantidad de MWCNT en mg fue el lote **RON**, obteniendo 218.4 mg, siendo el más prometedor en términos de cantidad y en contraparte el lote con una menor cantidad de mg fue **CNN**, obteniendo 13.8 mg, aunque las condiciones fueron las mismas para cada uno de los experimentos, la fuente de carbono juega un papel muy importante para el crecimiento de los MWCNT. Estos resultados pueden asociarse a las características moleculares de cada precursor.

Tabla 1. Comparación de resultados de MWCNT por lote (CNT, RON, CLN y CNN).

Nombre de la síntesis	Catalizador Ferroceno (mg)	Fuente de carbono (mL)	Molaridad (M)	Tiempo de reacción (min)	Cantidad obtenida MWCNT (mg)
CNT	222	10	0.12	20	988.0
RON	112	6	0.10	20	218.4
CLN	112	6	0.10	20	151.6
CNN	112	6	0.10	20	13.8

Es necesario comentar que cada síntesis presentó diferencias al momento de comenzar la nebulización para las síntesis **RON** y **CLN** la aspersión que salía del nebulizador era constante, prolongado, y denso, sin embargo, para el lote de síntesis **CNN** las características anteriores no fueron notables.

La cantidad de solución preparada para cada síntesis es de 6 mL, sin embargo, esta cantidad no se nebuliza por completo, aunque el tiempo reacción sea el mismo, para las síntesis **RON** y **CLN** la cantidad que se nebuliza es de alrededor de 5 ml, y para **CNN** es aproximadamente de 3.5 mL, entonces, tenemos que el rendimiento para cada síntesis no es el mismo, este fenómeno se atribuye a las propiedades químicas de cada una de las fuentes de carbono, como puede ser la densidad de los precursores.

4.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La morfología y el tamaño de los nanomateriales se analizaron mediante SEM, se observan partículas casi esféricas, separadas entre sí (Figura 7), al revisar la estructura general y el crecimiento de los MWCNT etiquetados como **CNN**, tenemos como resultado la presencia de nanotubos de carbono entrelazados, con forma de fideos y densamente empaquetados, de 5 μm de longitud. Estos resultados concuerdan con el trabajo realizado por Paul y colaboradores [18], donde obtienen MWCNT con morfologías similares a la micrografía mostrada en la Figura 7. El análisis por SEM presentado en el trabajo realizado por Azmina [17] muestra resultados que difieren con lo observado mediante sem de nuestro trabajo, ya que ellos obtuvieron MWCNT con una mejor morfología superficial y diámetros de tubo en el rango de 80,0 - 100,0 nm. La explicación de las diferencias en la morfología superficial



y el diámetro de los nanotubos de carbono producidos está relacionada con la composición y densidad del aceite utilizado como precursor.

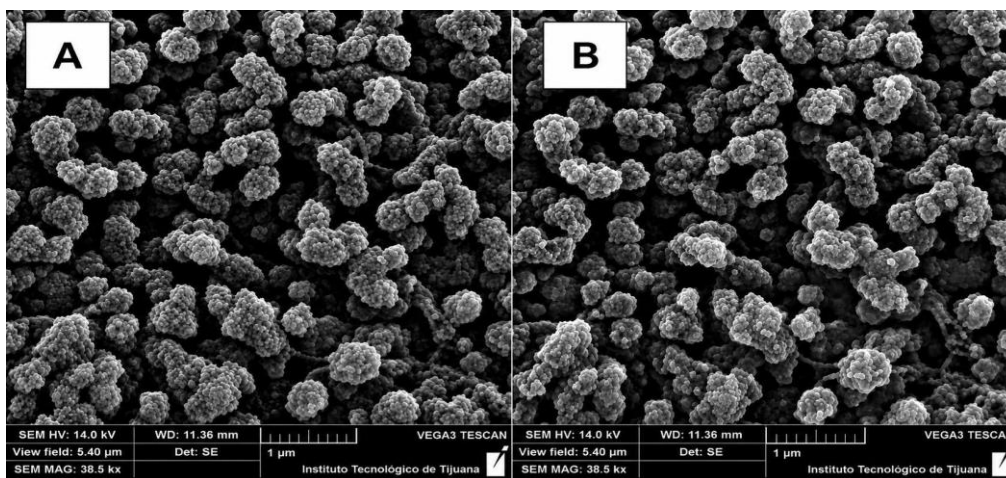


Figura 7. A) Micrografías obtenidas por SEM de MWCNT lote CNN con mayor contraste para una mejor definición de la morfología casi esférica, B) SEM con menor contraste.

En la micrografía de la Figura 8 que pertenece a la síntesis del lote **RON**, se muestran nanomateriales limpios, con pocas impurezas debidas probablemente al carbón amorfo. Los nanotubos presentan una longitud promedio de 0,213 mm, con este método de caracterización se comprueba que la síntesis ha sido exitosa en cuanto a la obtención de estructuras de nanotubos. Desafortunadamente no existe una publicación donde se use aceite esencial de *Rosmarinus Officinalis L.* Como precursor en la síntesis de MWCNT por lo que no podemos comparar la microscopía obtenida.

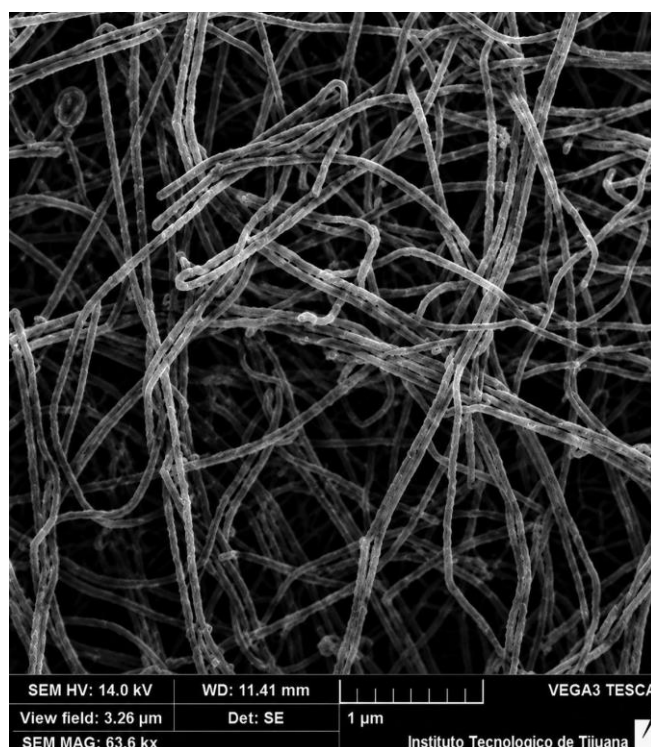


Figura 8. Micrografía obtenida por SEM de MWCNT lote RON.

La muestra analizada en la Figura 9, corresponde al lote etiquetado como **CLN**, podemos comprobar la existencia de MWCNT resultado de la síntesis llevada a cabo, visualmente son similares a los obtenidos en el lote **RON**, nanotubos con pocas impurezas. Desafortunadamente en la actualidad no



existen artículos donde se use aceite esencial de *Citrus x Limón* como precursor en la obtención de MWCNT por lo que no contamos con alguna microscopía para realizar comparación.

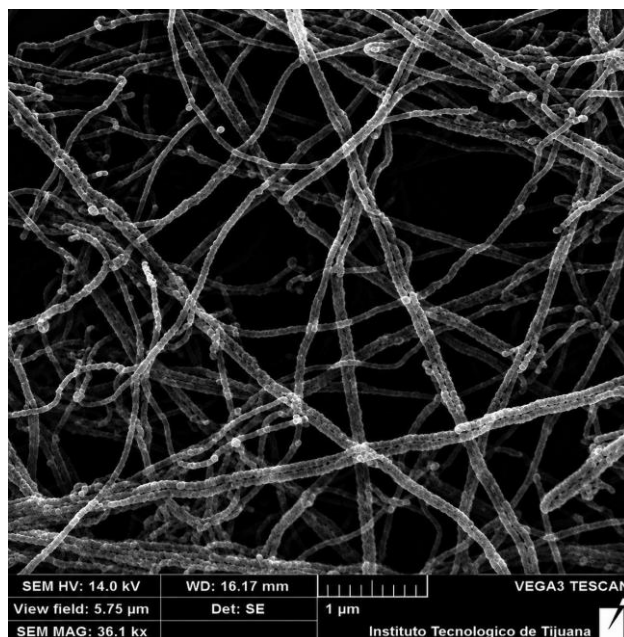


Figura 9. Micrografía obtenida por SEM de MWCNT lote CLN.

4.3 Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

En la Figura 10A podemos observar la imagen más definida de un nanotubo de carbono analizado por TEM, correspondiente al lote de MWCNT “RON”, el cual fue el precursor de mayor interés debido a la mayor cantidad obtenida de producto, en comparación a los demás lotes. Con ayuda del software ImageJ Js se evidencia que el nanotubo observado cuenta con 35 paredes de lado izquierdo y 36 paredes de lado derecho. Así como un diámetro externo 69.18 nm y un diámetro interno 21.63 nm.

El MWCNT “RON” visiblemente tiene menos capas y diámetro mayor en comparación al nanotubo mostrado en la Figura 10B, etiquetado con el lote “CNT”. Estos nanotubos cuentan con 54 paredes de lado izquierdo y 55 paredes de lado derecho, un diámetro externo de 53.42 nm y diámetro interno de 17.17 nm. Además, se logró determinar la distancia interplanar de los átomos de carbono de 0.34 nm. Finalmente, en la Figura 10 tenemos el análisis elemental de nuestro principal MWCNT de interés “RON”.

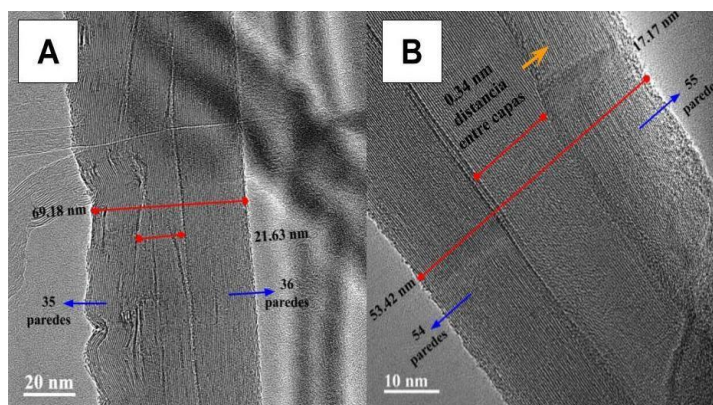


Figura 10. (A) Micrografías obtenidas por TEM de MWCNT lote RON con número de capas, diámetro exterior e interior visibles y (B) Micrografía obtenida por TEM de MWCNT lote CNT con número de capas, diámetro exterior e interior visibles.

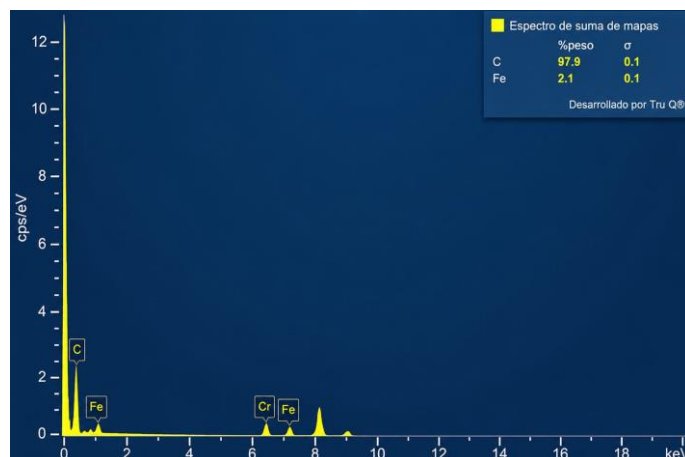


Figura 11. Espectro por EDS para el análisis elemental del lote “RON” MWCNT de interés por el resultado en mg.

4.3.1 Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersa (EDS)

Para analizar la morfología se obtuvieron imágenes en campo claro (BF) y campo oscuro (DF). En la Figura 12 puede observarse la micrografía de MWCNT lote RON, Figura 12A es el campo oscuro de la micrografía y en la Figura 12B el campo claro.

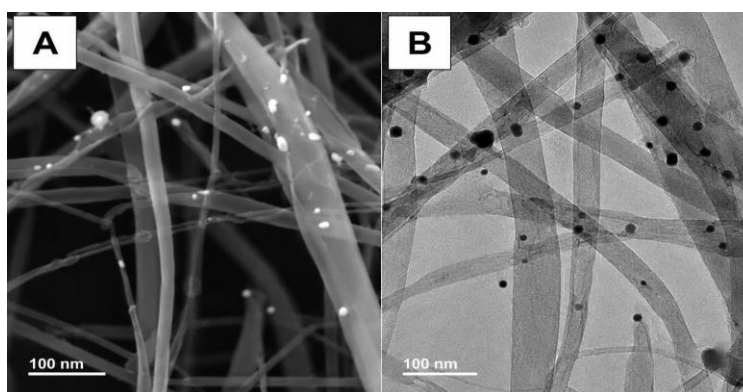


Figura 12. (A) Micrografías obtenidas por TEM de Campo Oscuro y (B) Campo Claro del lote RON.

En la Figura 13 se observa la micrografía de MWCNT lote CNT, que es el nanomaterial de referencia, sintetizado con un precursor tradicional. En la Figura 13A podemos observar el campo oscuro y en la Figura 13B el campo claro, podemos apreciar de forma más clara la morfología correspondiente a los MWCNT sintetizados.

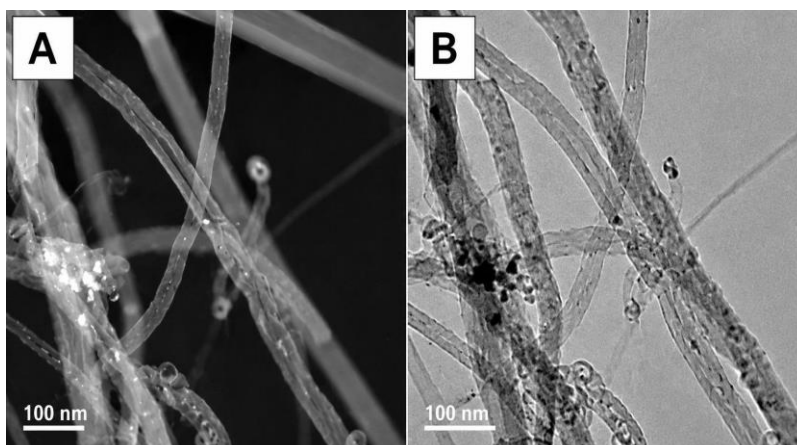


Figura 13. Micrografías obtenidas por TEM de la muestra CNT (A) Campo Oscuro y (B) Campo Claro.



4.3.2 Difracción de Electrones de Área Seleccionada (SAED)

Una vez realizado el análisis por EDS se llevó a cabo la técnica de difracción de área selecta (SAED), utilizando esta técnica se llevó a cabo con un equipo Hitachi HT7700 a 100 kV. Por medio de un patrón de difracción SAED se pueden observar algunas de las simetrías características de un cristal (Figura 14).

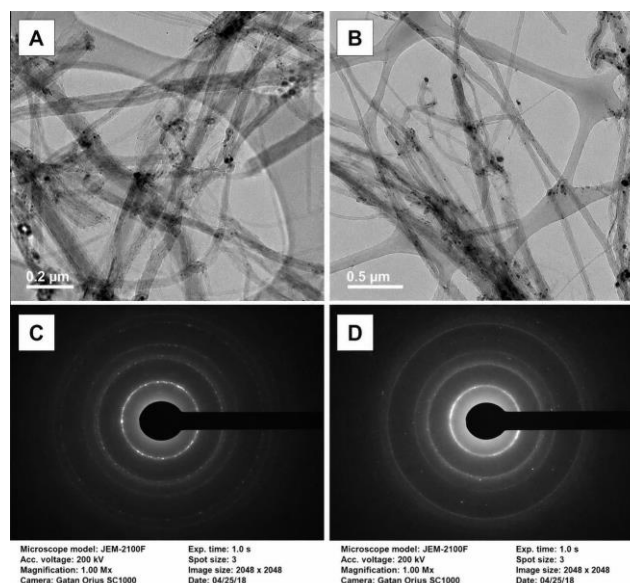


Figura 14. Micrografías de (A) Muestra RON policristalina de calibración y su correspondiente patrón de difracción de anillos (C). (B) Muestra CNT se observa la difracción de policristales “no infinitos” como un patrón de anillos discontinuos, (D) como el tipo de patrón de difracción característico que se podría obtener para cada una de estas.

En la Figura 14A, se observa una muestra policristalina cuyo patrón de difracción característico se presenta en la Figura 14C, exhibiendo círculos concéntricos en donde cada círculo corresponde a una familia de planos de los cristales en cuestión. Por otro lado, cuando el número de cristales no es “infinito” como en el caso de la Figura 14A, el patrón de difracción no muestra anillos continuos sino discontinuos y se aprecian unos puntos brillantes sobre los mismos (Figura 14B y 14D).

4.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

En la Figura 15 se muestra el termograma para todas las síntesis, la estabilidad térmica para el material **CLN es mayor que las otras tres**, iniciando alrededor de los 560 °C, aunque el comportamiento térmico de CNT es similar y además es la referencia comparativa. Así mismo, podemos relacionar el comportamiento de la muestra RON con el análisis elemental mostrado en la Figura 11 y resaltar de manera notable la cantidad de residuo metálico que resulta menor que todas las muestras analizadas por lo que se sugiere una mayor actividad catalítica del Fe que interactúa favorablemente con el precursor natural orgánico durante el crecimiento de los nanotubos.

Partiendo de la estructura bioactiva de cada precursor, se infiere también, que aquellos que poseen grupos funcionales de oxígeno, tales como los: hidroxilos, cetonas y carboxílicos, proveen a las estructuras carbonosas de grupos con oxígeno, a raíz de lo anterior, la causa de las múltiples caídas que presentan los MWCNT, a excepción de la primera caída alrededor de los 100 °C, que corresponde a la humedad de las nanoestructuras.

De acuerdo con los estudios realizados por Paz-González, J. A. y colaboradores, se pueden comparar los resultados obtenidos para los MWCNT prístinos, debido a que el método de síntesis es el mismo [27].

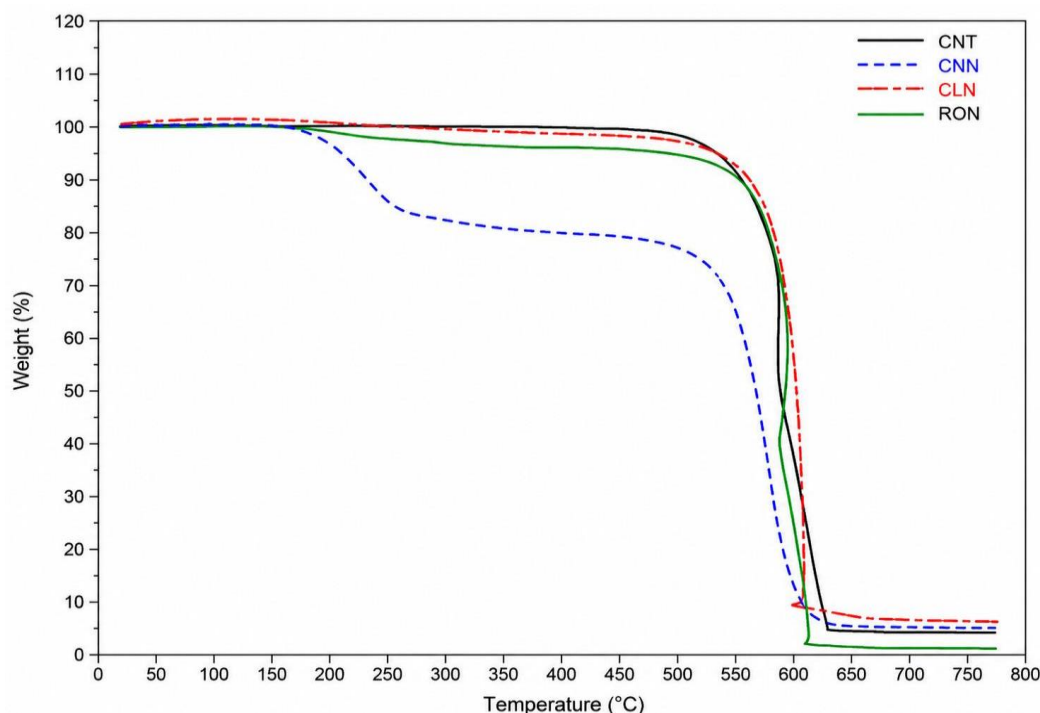


Figura 15. Termograma obtenido por TGA de los lotes CNT, CNN, CLN y RON.

4.4 Espectroscopía RAMAN

En la espectroscopia Raman se observan las bandas D, G y G' en ese orden, el cociente entre las intensidades entre la banda D/G sirven para establecer criterios cuantitativos que nos resultan útiles para determinar el orden de las unidades estructurales, así como también el número de defectos presentes en las síntesis. Los resultados correspondientes a las bandas D y G de los MWCNT pueden compararse también con el trabajo previamente mencionado, en donde se presenta una caracterización de espectroscopia Raman de MWCNT sintetizados con precursor Tolueno, usando el mismo catalizador y mismas condiciones de síntesis, debido a que este trabajo es parte de nuestra referencia metodológica [27].

En la Figura 16 se observa que la banda D para la síntesis con precursor con una biomolécula sin oxígeno contiene la mayor intensidad $ID/G = 1.21$ corresponde al lote **CLN** y el que material con un menor $ID/G = 0.99$ es nuestra muestra de interés **RON**, el elevado ID/G indica una mayor cantidad de defectos en la superficie del material. También se pueden observar todos los desplazamientos de todos los materiales:

CNN banda D en 1312 cm^{-1} y la banda G en 1595 cm^{-1}

RON banda D en 1309 cm^{-1} y la banda G en 1582 cm^{-1}

CLN banda D en 1305 cm^{-1} y la banda G en 1578 cm^{-1}

Las relaciones entre la banda de G y G' no resultan ser significativas, teniendo como consecuencia MWCNT con un bajo grado de cristalinidad.

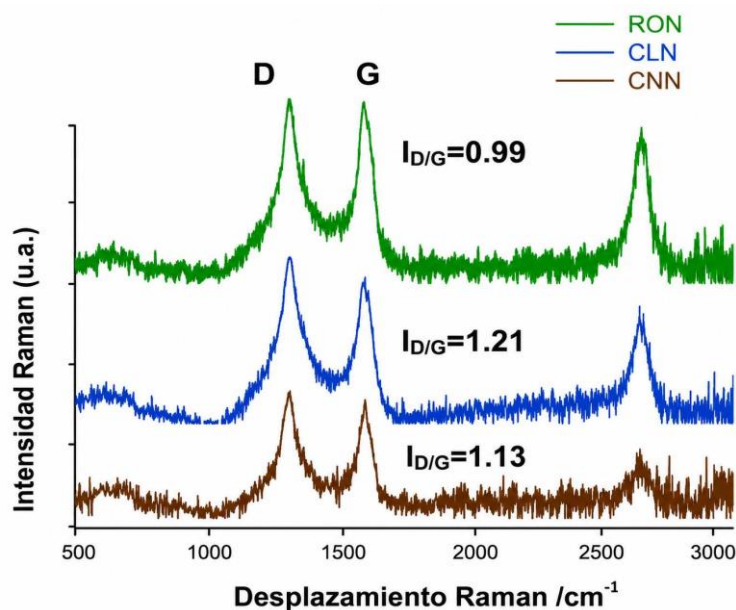


Figura 16. Espectros obtenidos por Raman de RON, CLN y CNN.

5. Conclusiones

La síntesis de MWCNT evidenció que el precursor de carbono es un factor determinante en la cantidad de producto obtenida y en las propiedades del material. Se logró obtener MWCNT sintetizados a partir de tres diferentes precursores naturales etiquetados como RON, CNN y CLN demostrando que las especies vegetales implementadas para la obtención de precursores naturales sí pueden producir nanomateriales bajo un proceso de síntesis de pirólisis modificadas, la metodología permitió controlar y replicar las condiciones claves para el proceso, de esta forma se comprueba la existencia de nuevos posibles precursores de fácil acceso, más baratos y abundantes en contraparte a los precursores de hidrocarburo tradicionalmente utilizados.

Bajo condiciones constantes, RON mostró la mayor eficiencia por generar una mayor cantidad de producto después de la síntesis, además de que tiene una estructura atómicamente más ordenada y bien definida entre los precursores naturales, mientras que CNN presentó el menor rendimiento en cuanto a cantidad de producto obtenido e impurezas que evidencian tanto en las micrografías, la espectroscopia Raman y los resultados por TGA, lo anterior puede asociarse a diferencias en propiedades fisicoquímicas que influyen en la nebulización y el crecimiento de los nanotubos.

El análisis SEM confirmó la formación de MWCNT en todas las muestras, con variaciones en morfología, longitud y pureza, destacando RON por presentar menor contenido de impurezas y mayor rendimiento de los precursores verdes. El TGA indicó diferencias en estabilidad térmica, siendo CLN el más estable, lo cual se relaciona con la presencia de grupos funcionales oxigenados.

La espectroscopia Raman evidenció la presencia de defectos estructurales en todos los materiales, con mayor desorden en CNN y, en general, un bajo grado de cristalinidad. Estos resultados confirman la viabilidad de aceites esenciales como precursores, aunque requieren optimización para mejorar la calidad estructural de los MWCNT.



6. Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Tecnológico Nacional de México por el proyecto financiado **20552.24-P** y al Dr. Arturo Zizumbo López del Centro de Graduados e Investigación en Química por facilitar los recursos e instalaciones para la realización de este proyecto, así como al Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Chihuahua. Los autores también agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo financiero.

7. Agradecimiento de autoría

Isis Alejandra Hernández Rivera: Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis Formal; Investigación; Borrador original; Investigación; Análisis de datos; Escritura. *Rocío Alejandra Cera García:* Ideas; Conceptualización; Investigación. *Víctor Raúl López López:* Metodología; Investigación; Conceptualización. *Luis Ernesto Solís Delgado:* Ideas; Conceptualización. *Balter Trujillo Navarrete:* Ideas; Análisis de datos. *Francisco Paraguay Delgado:* Recursos; Análisis formal; Análisis de datos. *Yadira Gochi Ponce:* Conceptualización; Recursos; Análisis formal; Escritura; Revisión y edición; Administración de proyecto.

Referencias

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, pp. 56–58, 1991, doi: 10.1038/354056a0.
- [2] P. Kesharwani, V. Mishra, and N. K. Jain, "Validating the anticancer potential of carbon nanotube-based therapeutics through cell line testing," *Drug Discovery Today*, vol. 20, pp. 1049–1060, 2015, doi: 10.1016/j.drudis.2015.05.004.
- [3] M. A. Saleemi, M. H. Fouladi, P. V. C. Yong, K. Chinna, N. K. Palanisamy, and E. H. Wong, "Toxicity of carbon nanotubes: Molecular mechanisms, signaling cascades, and remedies in biomedical applications," *Chem. Res. Toxicol.*, vol. 34, pp. 24–46, 2021, doi: 10.1021/acs.chemrestox.0c00172.
- [4] G. T. T. Le, P. Mala, S. Ratchahat, and T. Charinpanitkul, "Bio-based production of carbon nanotubes via co-pyrolysis of eucalyptus oil and ferrocene," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 158, Art. no. 105257, 2021, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105257.
- [5] E. T. Thostenson, Z. Ren, and T.-W. Chou, "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, pp. 1899–1912, 2001, doi: 10.1016/S0266-3538(01)00094-X.
- [6] R. Kumar, R. S. Tiwari, and O. N. Srivastava, "Scalable synthesis of aligned carbon nanotube bundles using neem oil," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 6, pp. 2–7, 2011, doi: 10.1186/1556-276X-6-92.
- [7] R. Kumar, R. K. Singh, and D. P. Singh, "Natural and waste hydrocarbon precursors for the synthesis of carbon-based nanomaterials," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 976–1006, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.120.
- [8] M. E. Guerrero-Llamas, L. E. Solís-Delgado, L. J. Villarreal-Gómez, E. Méndez-Valenzuela, and Y. Gochi-Ponce, "Evaluación in vitro de nanomateriales de carbono para aplicaciones biotecnológicas," *Pädi*, vol. 14, pp. 318–323, 2026, doi: 10.29057/icbi.v14iEspecial.15389.
- [9] Z. H. Abdel, A. Abdul, F. Abdel, and S. S. Abdel Rehim, "Challenges on synthesis of carbon nanotubes from green oil using pyrolysis technique," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 126, pp. 218–229, 2017, doi: 10.1016/j.jaap.2017.06.005.
- [10] R. Sen, A. Govindaraj, and C. N. R. Rao, "Carbon nanotubes by the metallocene route," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 267, pp. 276–280, 1998, doi: 10.1016/S0009-2614(97)00080-8.
- [11] M. J. Bronikowski, "CVD growth of carbon nanotube bundle arrays," *Carbon*, vol. 44, pp. 2822–2832, 2006, doi: 10.1016/j.carbon.2006.03.022.
- [12] K. Awasthi, R. Kumar, R. S. Tiwari, and O. N. Srivastava, "Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes using turpentine oil," *J. Exp. Nanosci.*, vol. 5, pp. 498–508, 2010, doi: 10.1080/17458081003664159.
- [13] P. Ghosh, T. Soga, K. Ghosh, R. A. Afre, T. Jimbo, and Y. Ando, "Vertically aligned N-doped carbon nanotubes by spray pyrolysis," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 354, pp. 4101–4106, 2008, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2008.05.053.
- [14] P. Ghosh, R. A. Afre, T. Soga, and T. Jimbo, "Production of single-walled carbon nanotubes from eucalyptus oil," *Mater. Lett.*, vol. 61, pp. 3768–3770, 2007, doi: 10.1016/j.matlet.2006.12.030.
- [15] R. Kumar, R. K. Singh, and R. S. Tiwari, "High-yield synthesis of nitrogen-doped carbon nanotubes using sesame oil," *Mater. Des.*, vol. 94, pp. 166–175, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.025.
- [16] G. Late, B. Vishwanathan, S. Bhowmik, and M. Sharon, "Natural precursors for synthesis of carbon nanomaterials by CVD: A review," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 7, pp. 2319–7064, 2016, doi: 10.21275/ART2018338.



- [17] M. S. Azmina, A. B. Suriani, M. Salina et al., “Bio-hydrocarbon precursors for synthesis of carbon nanotubes,” *Nano Hybrids*, vol. 2, pp. 43–63, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/NH.2.43.
- [18] S. Paul and S. K. Samdarshi, “A green precursor for carbon nanotube synthesis,” *New Carbon Mater.*, vol. 26, pp. 85–88, 2011, doi: 10.1016/S1872-5805(11)60068-1.
- [19] Y. Jiang, N. Wu, Y.-J. Fu et al., “Chemical composition and antimicrobial activity of rosemary essential oil,” *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 32, pp. 63–68, 2011, doi: 10.1016/j.etap.2011.03.011.
- [20] S. Nazirah, A. A. Azira, and M. Rusop, “Synthesis of carbon nanotubes from camphor oil,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 667, pp. 421–424, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.667.421.
- [21] M. Kumar and Y. Ando, “Production of aligned carbon nanotubes from camphor,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 374, pp. 521–526, 2003, doi: 10.1016/S0009-2614(03)00742-5.
- [22] J. Flores-Valdez, W. Villastrigo-López, A. Castañeda-Facio, C. López-Badillo, S. Esparza-González, P. Acuña-Vázquez y A. Sáenz-Galindo, “Funcionalización verde de nanotubos de carbono de pared múltiple con extracto de romero,” *Revista Colombiana de Química*, vol. 55, pp. 3–8, 2026, doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v55n1.119894.
- [23] G. P. Amaral et al., “Protective action of ethanolic extract of *Rosmarinus officinalis* L. in gastric ulcer prevention induced by ethanol in rats,” *Food Chem. Toxicol.*, vol. 55, pp. 48–55, 2013, doi: 10.1016/j.fct.2012.12.038.
- [24] N. Mahato, M. Sinha, K. Sharma et al., “Extraction and purification of bioactive compounds from citrus wastes,” *Foods*, vol. 8, Art. no. 523, 2019, doi: 10.3390/foods8110523.
- [25] P. Agarwal, Z. Sebghatollahi, M. Kamal et al., “Citrus essential oils in aromatherapy,” *Antioxidants*, vol. 11, Art. no. 2374, 2022, doi: 10.3390/antiox11122374.
- [26] M. Kačániová, N. Čmiková, N. L. Vukovic et al., “Citrus limon essential oil: Composition and biological properties,” *Plants*, vol. 13, Art. no. 524, 2024, doi: 10.3390/plants13040524.
- [27] J. A. Paz-González, Y. Gochi-Ponce, C. Velasco-Santos et al., “Enhancing PLA/carbon fiber composites with MWCNT fillers,” *J. Compos. Sci.*, vol. 9, Art. no. 167, 2025, doi: 10.3390/jcs9040167.

Derechos de Autor (c) 2026 Isis Alejandra Hernández Rivera, Rocío Alejandra Cera García, Víctor Raúl López López, Luis Ernesto Solís Delgado, Balter Trujillo Navarrete, Francisco Paraguay Delgado, Yadira Gochi Ponce



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)