



Materiales conductores eléctricos compuestos de poliestireno reciclado y alótropos amorfos de carbono

Resumen

La presente investigación tuvo como finalidad diseñar materiales compuestos utilizando poliestireno reciclado (PSR) e incorporando carbón activado (CA), carbón reciclado (CR) y coque de carbón (CQ) en concentraciones de 0,5 a 3% en peso. Para la obtención de los materiales compuestos utilizamos el método de mezclado en solución asistido por energía de ultrasonido. De acuerdo a los resultados de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), los alótropos amorfos no alteran la estructura del PSR, además el análisis termogravimétrico demostró que estos le brindan mayor estabilidad térmica. En cuanto al ángulo de contacto, se observó una tendencia hacia la hidrofiliidad al incorporar los alótropos: se obtuvieron valores menores de 82° respecto al PSR con $126,2^\circ$. El material compuesto con mejor conductividad fue el PS/CA al 3% con un valor de $6,85 \times 10^{-4}$, lo que indica una buena transferencia de carga del CA a la matriz polimérica. Los materiales compuestos obtenidos a partir de PSR le brindan propiedades mejoradas a este material, como la conductividad eléctrica, por lo tanto, el material puede ser utilizado para dispositivos de almacenamientos, conectores eléctricos, entre otros usos que le dan una nueva vida útil al material y disminuyen su impacto contaminante.

Palabras clave: poliestireno; coque de carbón; carbón activado; carbón reciclado; material compuesto.

Electrically conducting materials based on recycled polystyrene and amorphous carbon allotropes

Abstract

The purpose of this research was to design composite materials using recycled polystyrene (PSR) and incorporating activated carbon (CA), recycled carbon (CR) and carbon coke (CQ) in concentrations of 0.5 to 3% by weight. To obtain the composite materials, we used the solution mixing method assisted by ultrasound energy. According to the results of Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), the amorphous allotropes do not alter the structure of the PSR, and the thermogravimetric analysis showed that they provide greater thermal stability. As for the contact angle, a tendency towards hydrophilicity was observed when incorporating the allotropes: values lower than 82° were obtained with respect to the PSR with $126,2^\circ$. The composite material with the best conductivity was the PS/CA at 3% with a value of 6.85×10^{-4} , which indicates a good charge transfer from the CA to the polymeric matrix. The composite materials obtained from PSR provide improved properties to this material, such as electrical conductivity, therefore, the material can be used for storage devices, electrical connectors, among other uses that give a new useful life to the material and decrease its polluting impact.

Keywords: polystyrene; carbon coke; activated carbon; recycled carbon; composite material.

Materiais condutores elétricos baseados em poliestireno reciclado e alótropos de carbono amorfo

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi projetar materiais compostos usando poliestireno reciclado (PSR) e incorporando carvão ativado (CA), carvão reciclado (CR) e coque de carvão (CQ) em concentrações de 0,5 a 3% em peso. Para obter os materiais compostos, usamos o método de mistura de solução assistida por energia de ultrassom. De acordo com os resultados da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), os alótropos amorfos não alteram a estrutura do PSR, e a análise termogravimétrica mostrou que eles proporcionam maior estabilidade térmica. Quanto ao ângulo de contato, foi observada uma tendência à hidrofiliidade ao incorporar os alótropos: foram obtidos valores inferiores a 82° em relação ao PSR com $126,2^\circ$. O material composto com a melhor condutividade foi o PS/CA a 3% com um valor de $6,85 \times 10^{-4}$, o que indica uma boa transferência de carga do CA para a matriz polimérica. Os materiais compostos obtidos a partir do PSR proporcionam propriedades aprimoradas a esse material, como a condutividade elétrica, portanto, o material pode ser usado para dispositivos de armazenamento, conectores elétricos, entre outros usos que dão uma nova vida útil ao material e diminuem seu impacto poluente.

Palavras-chave: poliestireno; coque de carvão; carvão ativado; carvão reciclado; material composto.



Introducción

La contaminación por residuos plásticos es un problema global al que nos enfrentamos hoy en día. En 2019, la producción de plástico alcanzó los 9,1 millones de toneladas [1]. La principal desventaja para el medio ambiente ocasionada por los plásticos se debe a su larga vida útil, que oscila entre cientos y miles de años [2, 3]. Entre los plásticos que más contaminan encontramos los plásticos de un solo uso o también llamados plásticos desechables, que deben su nombre a que tras su primer uso se tiran a la basura. En 2021 se realizó una investigación sobre el impacto generado por los plásticos de un solo uso tras el paso de la pandemia de COVID-19, donde se destacó que tan solo en China su uso diario aumentó de 40 a 240 toneladas durante ese período [3]. Cabe señalar que el impacto contaminante provocado por la cantidad de residuos generados tras la pandemia perdurará por muchos años. Por otro lado, del total de plásticos producidos anualmente, 10 millones de toneladas métricas terminan en ecosistemas marinos, lo que representa el 4,7% del total de residuos plásticos generados en el mundo [4, 5], lo cual provoca no solo contaminación, sino también que animales marinos se enreden en residuos plásticos o que los ingieran y se asfixien [6].

Hay dos categorías principales dentro de los polímeros: naturales y sintéticos. A su vez, existen dos grupos de polímeros: los termoplásticos, que son un grupo que se pueden fundir y enfriar repetidamente sin sufrir cambios estructurales, por lo que pueden ser reciclados y reprocesados; y los termoestables, los cuales son polímeros que una vez calentados sufren cambios químicos creando una red tridimensional, evitando que se vuelvan a deformar una vez enfriados, por lo que no pueden volver a calentarse ni deformarse. La **figura 1** muestra los principales tipos de polímeros utilizados en la producción de plásticos de un solo uso, así como ejemplos de su aplicación [7]:



Figura 1. Principales polímeros utilizados para la fabricación de plásticos de un solo uso. Adaptado de [7].

Con el tiempo, en lugar de desaparecer, los plásticos se dividen en fragmentos más pequeños llamados microplásticos o nanoplásticos, que tienen un tamaño de partícula inferior a 5 nm. La contaminación por microplásticos está muy extendida y provoca grandes impactos ecológicos en todo el mundo. Como han demostrado numerosos estudios, los microplásticos están presentes en todos los océanos y continentes del planeta, ya que continuamente se van fragmentando y distribuyendo, y logran llegar a zonas remotas como los glaciares [8, 9].

Una gran cantidad de plásticos de un solo uso son elaborados a base de poliestireno (PS), el cual ha resultado una excelente opción para el uso diario por su estructura, rigidez, ligereza y, sobre todo, su bajo costo de producción [10]. Sin embargo, el PS es un tipo de plástico que genera una contaminación ambiental considerable porque, a diferencia de los monómeros y oligómeros de estireno, el PS no se descompone debido a su alto peso molecular y estabilidad estructural [11].

Con el fin de mitigar su impacto contaminante, el PS se ha utilizado

como matriz polimérica para obtener nuevos materiales compuestos. Los materiales compuestos son materiales multifásicos que se obtienen de forma artificial; están formados por dos fases, una llamada matriz o fase continua, y la otra llamada fase dispersa o discontinua. Ambas fases deben ser químicamente diferentes y estar separadas por una interfaz para proporcionar al material propiedades que normalmente no tendría [12–14]. La obtención de nuevos materiales ha sido beneficiosa, ya que al mezclar polímeros con refuerzos u otros polímeros, se han obtenido materiales compuestos con propiedades mejoradas respecto a las propiedades de los constituyentes primarios, lo que permite reutilizar los polímeros.

La fase discontinua en ocasiones está formada por partículas a base de carbono, ya que tienen excelentes propiedades físicas y químicas, entre ellas una alta densidad, la capacidad de transmitir el calor, estabilidad térmica, capacidad de conducción, dureza, flexibilidad, resistencia química, entre otras. Si la fase discontinua tiene un tamaño nanométrico, el material se denomina nanocompuesto [15, 16]. Entre las partículas a base de carbono que se han utilizado como fase discontinua se encuentran los alótropos de carbono, que se clasifican en alótropos cristalinos y amorfos. Entre los alótropos cristalinos más populares encontramos el grafeno y los nanotubos, que representan la forma híbrida sp^2 del carbono; también podemos encontrar dentro de este grupo los fullerenos, el grafito y el diamante [17]. Por otro lado, dentro de los alótropos amorfos encontramos el coque (CQ), el carbón mineral (CR) y el negro de humo, además de formas alternativas como el carbón activado (CA), que es una forma sólida de carbono que tiene una microestructura no gráfica desordenada y una estructura de superficie abierta [18].

El CA se consigue realizando una activación física o química. Si es por medios físicos, el CR es sometido a un tratamiento térmico a altas temperaturas, lo que le permite incrementar sus propiedades fundamentales como mayor porosidad, área superficial y alta capacidad de adsorción [19–21]. En cambio, si se realiza una activación química, el factor principal será el grado de impregnación mediante un reactivo (o sustancia química); es decir, a mayor reactivo, mayor será el pH superficial y, por tanto, la pérdida de rendimiento en la materia prima de origen para su obtención [22]. Entre sus usos, el CA se ha utilizado para la eliminación de agentes contaminantes en agua, así como soporte de nuevos catalizadores de mayor superficie y menos costosos, los cuales ya se encuentran actualmente en el mercado [20, 23].

Para reducir el impacto ambiental y mejorar la dispersión en la obtención de materiales compuestos, se han utilizado tecnologías alternativas, entre las que encontramos la tecnología de ultrasonidos. Esta no altera las características y propiedades de los productos. Además, se considera una tecnología sostenible y ecológica, tiene bajo costo, corto tiempo de tratamiento, mayor rendimiento, genera menos solventes tóxicos y reduce los riesgos químicos [24–26].

El propósito de esta investigación es desarrollar materiales compuestos poliméricos a base de poliestireno reciclado (PSR) y alótropos de carbono amorfos como CA, CR y CQ para aplicaciones futuras. El CR y el CQ, al igual que el PS, fueron reciclados, lo cual minimiza los costos de los materiales compuestos y fomenta el reciclaje. Además, el proceso fue asistido por tecnología de ultrasonido, con el objetivo de mejorar las propiedades conductoras de los materiales para que puedan ser utilizados a futuro en, por ejemplo, el desarrollo de fibras a base de PS decoradas con CA para la absorción de tintes orgánicos contaminantes como el violeta cristal, el cual está presente en aguas residuales [27], o como espumas a base de PS/nanofibras de carbono, utilizadas como aislantes térmicos para la gestión del calor en diversas industrias, es decir, que permitan transferir el calor de un lugar a otro, lo cual ayuda a disminuir la huella de carbono y promueve el desarrollo sostenible [28, 29].

Materiales y métodos

Materiales

Para el desarrollo experimental se utilizó carbón activado (CA) grado reactivo marca Analytika (P.A. 12,01, lote C04FAK2201, No. CAS 7440-44-0 UN 1362), carbón reciclado (CR) y coque de carbón (CQ). También se usó acetato de etilo marca Jalmek como solvente y se usó PS recolectado de productos desechados dentro de la Universidad Autónoma de Coahuila como matriz polimérica.

Preparación de CR y CQ

Para incorporar el CR y el CQ, que eran materiales reciclados, se trituraron en un mortero de ágata. En el caso del CA, no requirió ninguna preparación ya que se adquirió comercialmente.

Recolección, limpieza y desinfección de poliestireno reciclado (PSR)

Se recogieron plásticos de un solo uso a base de PS a partir de productos desechados. Posteriormente, estos fueron lavados con agua corriente y jabón. Para el proceso de desinfección se utilizó una solución de hipoclorito de sodio y agua en proporción 2:100 y los materiales se sumergieron durante 1 min. Finalmente, el PSR se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 h [30].

Diseño y producción de materiales compuestos alótopos de PS/carbón

Como se muestra gráficamente en la **figura 2**, para la preparación de los materiales se pesó 1 g de PSR al que se le agregaron CA, CR y CQ en concentraciones de 0,5, 1 y 3% en peso (las muestras se pesaron por triplicado). Posteriormente, las muestras se diluyeron con acetato de etilo y luego se colocaron en un baño de ultrasonido Branson modelo 5510 durante 5 min a temperatura ambiente. Además, a modo de comparación, se prepararon muestras de PS blanco sin la adición de ninguno de los alótopos de carbono.

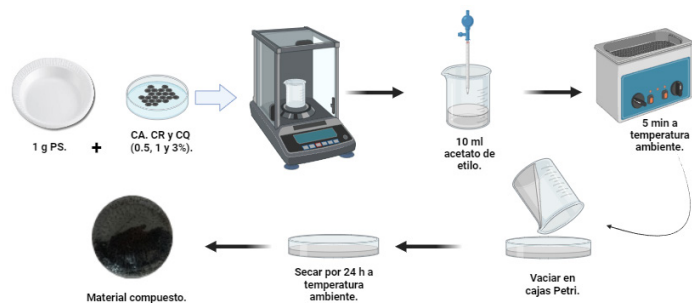


Figura 2. Preparación de materiales compuestos basados en PSR y alótopos de carbono.

Caracterización de alótopos y materiales poliméricos

Tamaño de partícula

La medición de tamaño de partícula se realizó a los alótopos de carbono amorfos utilizando el instrumento de dispersión de luz dinámica Litesizer DLS 500 marca Anton Paar, por lo que se pesaron 50 mg de muestra, posteriormente se adicionaron 5 mL de solución de agua estéril. La muestra se agitó en vórtex y se transfirió a una celda Univette, la cual se colocó en el equipo previamente configurado para la medición de tamaño de partícula.

Análisis espectroscópico por transformada de Fourier (FTIR)

La caracterización se realizó mediante espectroscopia infrarroja utilizando un equipo GX-Perkin-Elmer, con un *pellet* de KBr (para CA, CR y CQ, que son polvos) y Reflexión Total Atenuada (ATR) con un accesorio de punta de diamante (para películas). Las muestras fueron procesadas en un rango de 450 a 580 cm^{-1} , con resoluciones de 2 cm^{-1} y con 32 escaneos.

Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico o TGA se realizó utilizando un equipo Pyris-Perkin-Elmer con una velocidad de calentamiento de 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, un rango de temperatura de 30 a 800 $^{\circ}\text{C}$ y bajo una atmósfera de nitrógeno.

Medición del ángulo de contacto

Se realizó la medición del ángulo de contacto, para lo cual, en el caso de CA, CR y CQ se colocaron sobre cinta doble cara y se compactaron con ayuda de unas pinzas. Para la medición se utilizó un goniómetro Drop Shape Analyzer marca KRUSS, con el cual se añadió una gota de agua de 2 μL a los alótopos compactados, con lo que se identificó y midió el ángulo entre la superficie y la gota. En el caso de los materiales diseñados se cortaron muestras de 1 cm y se siguió el mismo procedimiento que para los alótopos compactados. El software del equipo permite la detección de la gota formada y el ángulo formado.

Conductividad eléctrica

Para realizar la medición de la resistividad eléctrica de los materiales compuestos se utilizó un multímetro convencional AstroAl modelo DM6000AR de dos sondas, para lo cual se diseñaron películas circulares con un diámetro de 10 cm. Para la medición se colocaron las dos puntas del multímetro sobre las películas en diferentes secciones de la muestra hasta obtener un total de 5 lecturas. Para medir la resistividad del PS puro se utilizó el método ASTM D257-14(2021) midiendo con un electrómetro High Resistance Meter 6517B marca Keithley, para lo cual se realizaron películas de 6 \times 6 cm del nanocompuesto para cubrir el área de contacto de los electrodos del electrómetro. A partir de los datos obtenidos se utilizó la Ec. (1), donde ρ es el valor de resistividad ($\Omega\cdot\text{cm}$) y σ es la conductividad eléctrica (S/cm):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

Resultados y discusión

Tamaño de partícula

En la **figura 3** se muestran las gráficas obtenidas de los valores promedio medidos de los tamaños de partícula de los alótopos amorfos de carbono para CA, CR y CQ. En el caso de CA se obtuvieron valores entre 443 y 1633 nm, siendo el primero el más frecuente con un porcentaje del 46,36%. Para el CR el mayor tamaño de partícula se centró en un 80,63% en 772,01 nm y para CQ los valores estuvieron entre 919 y 1252 nm con una frecuencia 46,04%, con un valor medio de 1075 nm. Para que un material sea considerado dentro de la escala nano se debe encontrar dentro de valores de 1 a 100 nm [31], de lo contrario son considerados como materiales, de este modo, al analizar los resultados de los tamaños de partícula obtenidos logramos observar que todos están muy por encima del tamaño máximo para ser considerados como nanoestructuras.

Espectroscopia FTIR (KBr)

La **figura 4** muestra el grupo de espectros de los alótopos de carbono utilizados en la investigación (CA, CR y CQ). El CA no mostró ninguna señal característica de grupos funcionales, por lo que se puede deducir que no está modificado sino estructuralmente compactado. Por el contrario, el CR y el CQ, que son materiales reciclados, mostraron bandas en los espectros. En el CR se observaron bandas a 3697 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones de estiramiento O-H, las cuales podrían corresponder a la presencia de grupos hidroxilo, carboxilo o agua que ha sido quimisorbida. A 1606 cm^{-1} se observa la banda de estiramiento de C=O, lo que se atribuye a la presencia de grupos como lactonas o quinonas. A 1423 cm^{-1} se observa el estiramiento de grupos C-H, y a 1018 cm^{-1} se atribuye al estiramiento

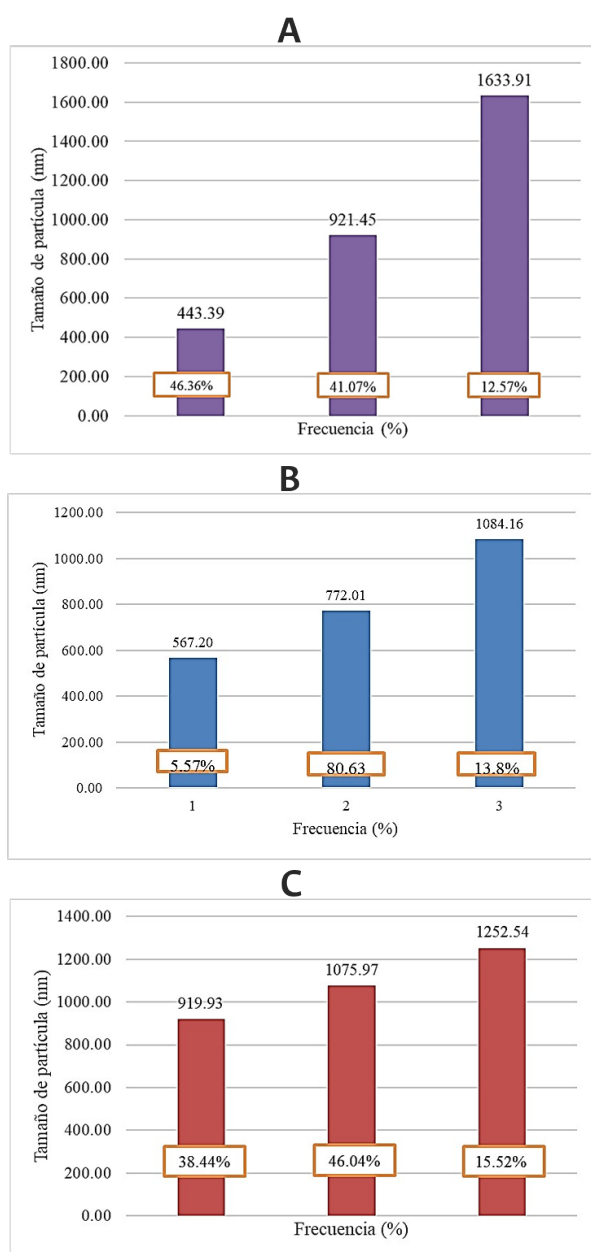


Figura 3. Gráficos tamaños de partícula A: CA, B: CR y C: CQ.

de vibraciones C–O correspondientes a ácidos carboxílicos, fenoles o éteres.

Se han hecho investigaciones recientes en donde se han mostrado resultados similares al caracterizar el CR con óxidos metálicos. H. Niu *et al.* obtuvieron bandas a 3430 cm^{-1} por la vibración de estiramiento de O–H, a 1628 cm^{-1} , causadas por la presencia de C=O, debido a la vibración de estiramiento de diferentes grupos funcionales como las quinonas, y a 1400 cm^{-1} debido a C–H estirándose en $-\text{CH}_2-$ o $-\text{CH}_3$. Además, obtuvieron bandas a 1089 cm^{-1} de la vibración de estiramiento C–O [25].

Por otro lado, el CQ presentó bandas a 1590 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones de estiramiento de C=O, y a 1423 cm^{-1} debido a las vibraciones de estiramiento de C–H. De acuerdo con algunas investigaciones, al analizar carbón elemental, CA y grafito se han obtenido resultados similares en 1384 cm^{-1} vibraciones de tensión simétricas de CH_3 . Así como en 1630 cm^{-1} la presencia de picos correspondientes a anillos de benceno, razón por la cual se incluyen estructuras aromáticas en el compuesto [32].

Por otro lado, en la figura 5 se muestra el espectro del PS blanco, con el fin de explicar las interacciones entre alótropos con el PSR en la obtención de los materiales compuestos. De 3200 a 2800 cm^{-1} se identifican tres bandas que corresponden al estiramiento de los

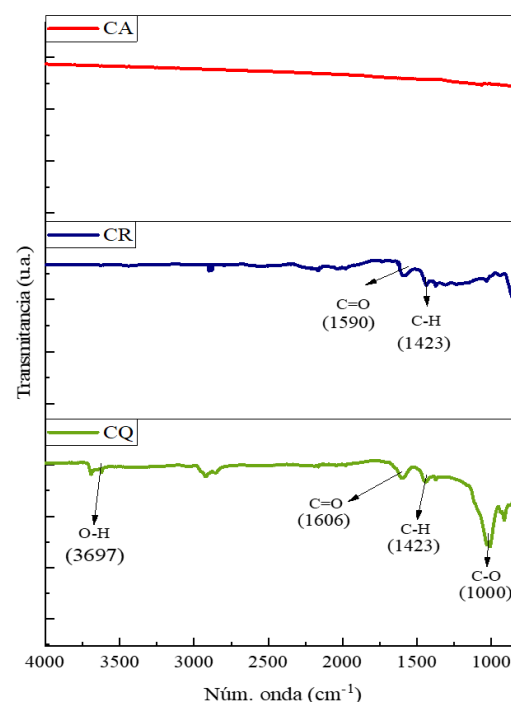


Figura 4. Espectro FTIR (KBr) alótropos amorfos de carbono.

enlaces $-\text{CH}_2-$, entre 1800 y 1400 cm^{-1} las bandas corresponden a los enlaces C=C y C–C debido a las vibraciones de estiramiento, y entre 1000 y 650 cm^{-1} las bandas en esa región corresponden a la tensión del anillo aromático. En 2015, se caracterizó por FTIR PS expandido reciclado, el cual mostró bandas similares entre 3100 y 3000 cm^{-1} y entre 1600 y 1450 cm^{-1} correspondientes al anillo aromático, mientras que entre 760 y 700 cm^{-1} se refieren a la región misma del PS en donde se encuentran las vibraciones del anillo monosustituido [33].

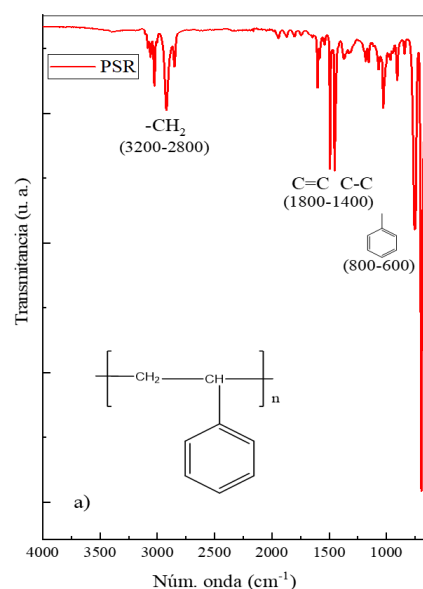


Figura 5. Espectro FTIR (ATR) de PSR.

La figura 6 muestra los grupos de espectros FTIR (ATR) de los materiales compuestos obtenidos de PSR con CA, CR y CQ en concentraciones de 0,5, 1 y 3% en peso, donde no hay presencia de desplazamiento de las bandas debido a la adición de los alótropos de carbono. Se han desarrollado nanomateriales basados en PS con óxido de grafito, donde las bandas del espectro FTIR que se obtuvieron al caracterizar en 3026 cm^{-1} , 2924 cm^{-1} y 2850 cm^{-1} corresponden al estiramiento simétrico y asimétrico del anillo de benceno. La vibración, así como la posición en 1492 cm^{-1} se atribuyó al estiramiento C=C y a la posición máxima de la vibración $\text{CH}=\text{CH}$ en el anillo de benceno. Finalmente, se observaron vibraciones de deformación fuera del plano $=\text{CH}$ en anillos de benceno a 757 y 700 cm^{-1} [34].

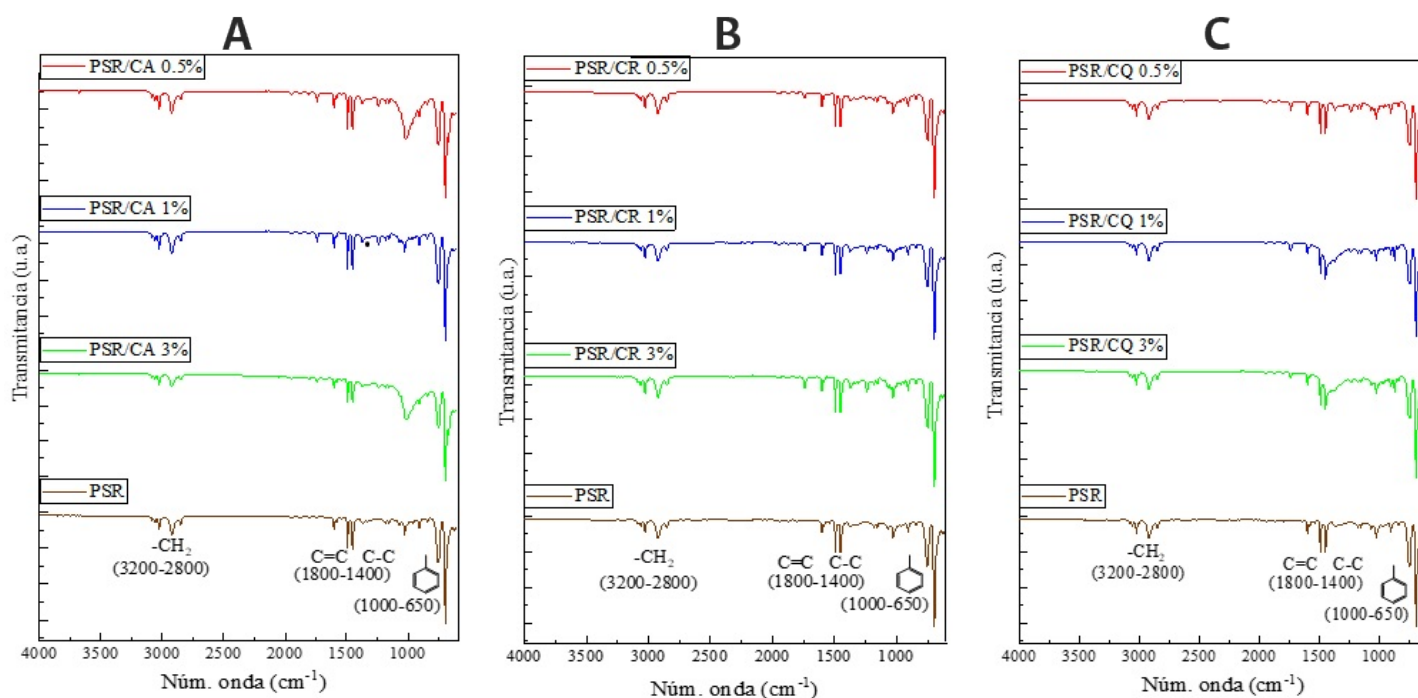


Figura 6. Espectros FTIR (ATR) de A: PSR/CA, B: PSR/CR y C: PSR/CQ.

Análisis termogravimétrico (TGA)

La figura 7 muestra los termogramas de PS, alótipos de carbono (CA, CR y CQ) y materiales compuestos, que indican la descomposición de cada uno de estos con respecto a la temperatura. Se puede observar que los alótipos presentaron dos pérdidas de masa. El primero entre 145 y 335 °C, el cual corresponde a la pérdida de humedad en porcentajes que oscilan entre el 9 y el 13% en peso. Como se ha informado, el carbono tiende a adsorber agua. Por lo tanto, alrededor de los 175 a 200 °C, el material comienza a perder humedad y se da el inicio de su descomposición, lo cual provoca la formación de CO, CO₂ y compuestos volátiles presentes. A partir de los 650 °C la mayor parte del material se ha descompuesto y únicamente queda carbono residual.

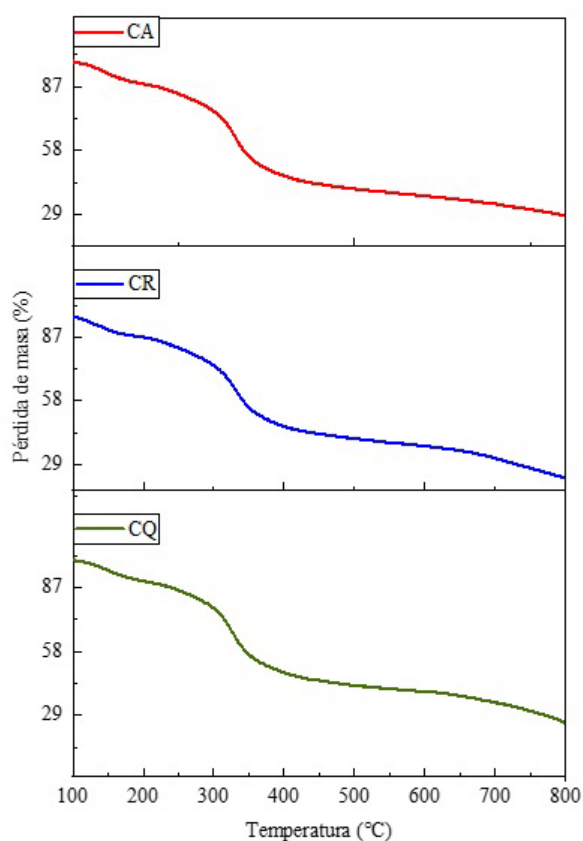


Figura 7. Termogramas de los alótipos de carbono CA, CR y CQ.

Tabla 1. Valores de T_{max} y pérdida de masa de alótipos de carbono.

Alótropo	T_{max}	% Pérdida de masa
CA	145,00	11,99
	335,66	48,52
	668,00	2,82
CR	148,66	12,59
	333,66	51,62
	706,66	9,78
CQ	168,00	12,43
	320,33	49,95
	745,66	12,37

T_{max} : temperatura máxima.

Como se ve en la figura 8A, la estabilidad térmica del PS se observa hasta 556 °C. Por otro lado, según la segunda derivada, se muestra una temperatura máxima de pérdida de masa (T_{max}) en 440,66 °C, además de tener una pérdida de masa del 94,23%, con una temperatura inicial de 281,33 °C y una temperatura final de 555,33 °C. Se sabe que el PS presenta degradación en un solo paso con una temperatura entre 400 y 440 °C.

Para los materiales compuestos, como se muestra en la figura 8, en el caso de PSR/CA 1%, la T_{max} de degradación se alcanzó a 451,66 °C en comparación con PSR/CA 3%, que fue de 456 °C. PSR/CA 1% presentó un porcentaje de pérdida de masa de 91,85% con una $T_{inicial}$ de 271,33 °C y una T_{final} de 557 °C lo que lleva a determinar un 8,15% de materia inorgánica. En el caso de PSR/CA 3%, el porcentaje de pérdida de masa fue del 91,27% con una $T_{inicial}$ de 165,66 °C y una T_{final} de 575,33 °C, y un 8,73% de materia inorgánica. Se determinó que el aumento de concentración afecta la pérdida de masa del material compuesto. Hasta ahora se han descrito muchos materiales compuestos basados en PSR con alótipos de carbono, como los nanotubos de carbono de paredes múltiples. Sin embargo, todavía hay pocos informes sobre la estabilidad térmica de los alótipos utilizados en la presente investigación. En resumen, se puede observar que a medida que aumentó la concentración de CA, aumentó la estabilidad térmica del material compuesto en comparación con el PS puro, por lo que podemos atribuir que la presencia de alótipos de carbono permite que el PS sea más estable térmicamente a altas temperaturas [35].

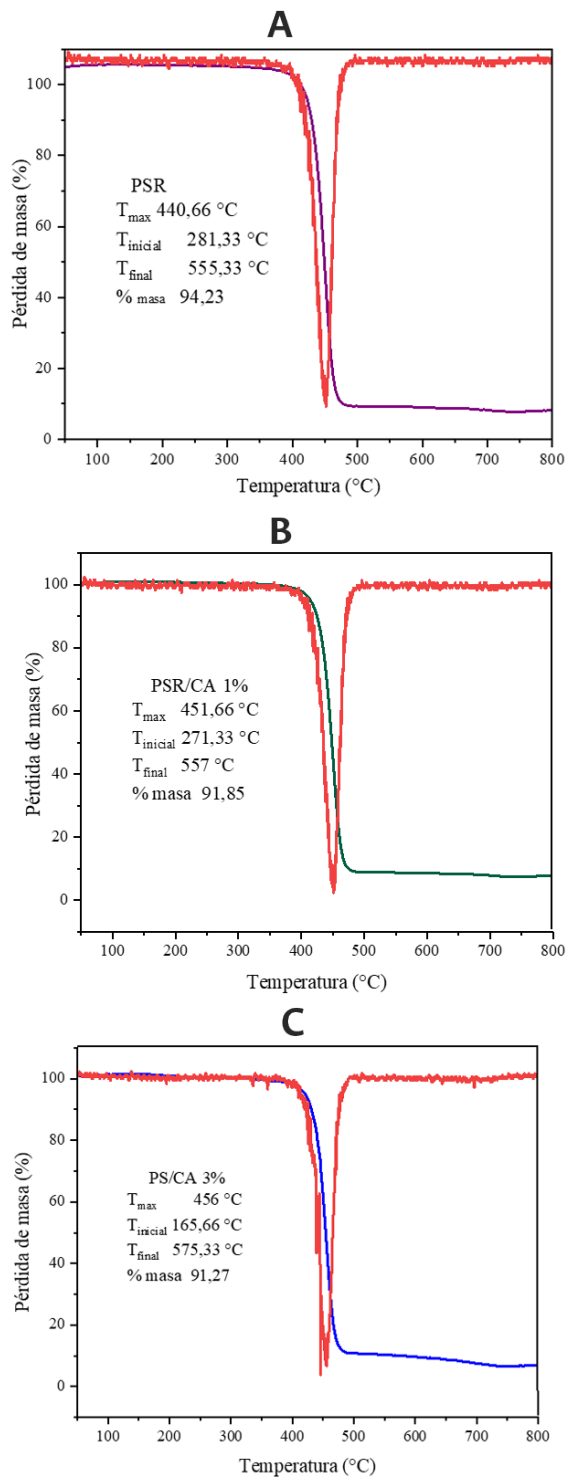


Figura 8. Termogramas A: PSR, B: PSR/CA 1% y C: PSR/CA 3%.

Ángulo de contacto

Otra técnica de caracterización que se realizó fue la medición del ángulo de contacto. Como se puede observar en la figura 9, el CA muestra un carácter polar, por lo que es altamente hidrófilo con un ángulo de 30°. Sin embargo, el CR y el CQ presentaron ángulos de 103 y 91,8° respectivamente, valores mayores en comparación con CA, cercanos a la hidrofobicidad, que muestran una formación de gotas más definida debido a la repulsión con el agua por el cambio de polaridad. Este cambio posiblemente ocurre porque los alótipos de carbono, al estar dispersos en la matriz polimérica, transfieren la carga, permitiéndole compartir su hidrofiliidad con el PS debido a las interacciones π entre los anillos aromáticos de su estructura y la del PS.

En la figura 9, el ángulo de contacto obtenido para el PSR también muestra un comportamiento hidrofóbico, lo que indica que la superficie no tiene afinidad por el agua, por lo que no existe interacción

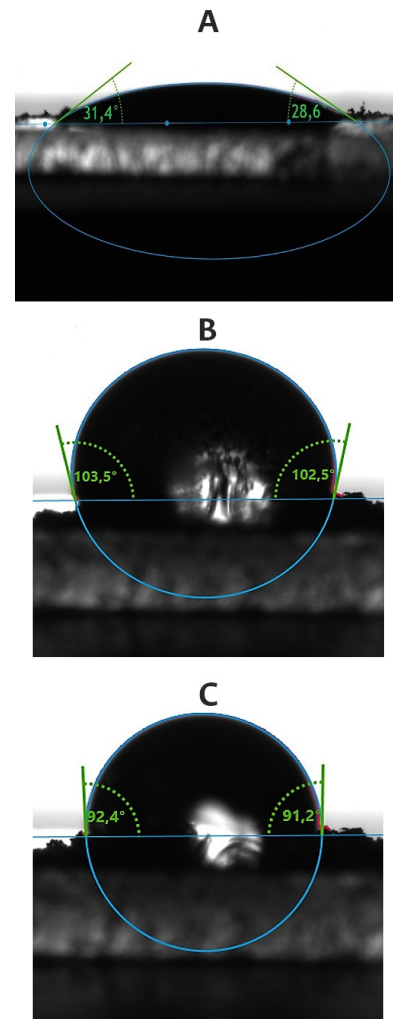


Figura 9. Ángulo de contacto del A: CA, B: CR y C: CQ.

entre ambas fases (líquida y sólida). Se han realizado algunas investigaciones en donde se ha determinado la hidrofobicidad del PS utilizando diferentes disolventes, incluida el agua, donde obtuvieron valores entre 115 y 130°, aproximadamente [36]. En el caso de los materiales compuestos, se obtuvo un valor mínimo de 81° para PSR/CR al 3% y 93,7° para PSR/CQ al 0,5% como valor máximo, comparado con el valor del PSR blanco, que tuvo un ángulo de 126,2° (tabla 2). La disminución del ángulo está estrechamente relacionada a la adición de la fase de refuerzo o discontinua a la matriz polimérica, esto permite un cambio en la polaridad de la superficie y confiriendo un aumento en su humectabilidad [37].

Tabla 2. Ángulo de contacto de los materiales compuestos PSR/alótipos de carbono.

Material compuesto	Concentración (%)		
	0,5	1	3
PSR/CA (°)	82,3	82,3	82,4
PSR/CR (°)	83,2	82,8	81,0
PSR/CQ (°)	93,7	83,2	82,3

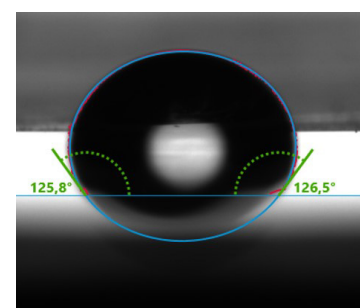


Figura 10. Ángulo de contacto de PSR blanco.

Conductividad eléctrica

En la **tabla 3** se muestran los valores de conductividad obtenidos a partir de la resistividad de los materiales compuestos poliméricos, PSR y alótropos amorfos de carbono. De las muestras preparadas, sólo las que tenían CA mostraron un valor de resistencia en los límites de detección del instrumento; por lo tanto, sólo para estas muestras se midió la conductividad. Los resultados sugieren que se necesita una concentración de 1% en peso de CA para superar el umbral de percolación y obtener valores de conductividad eléctrica medibles en nuestro límite de detección. Se observó que la mayor conductividad se obtuvo en PSR/CA al 3% con $6,55 \times 10^{-4}$ S/cm; esto se puede atribuir a la dispersión homogénea gracias al tratamiento con ultrasonido, que permite dotar de propiedades eléctricas al material compuesto. En cambio, en el caso de PSR/CR y PSR/CQ no hubo resultado. Esto puede deberse a la naturaleza de los alótropos, que es más desordenada y menos conductora eléctrica, ya que se espera una dispersión similar del relleno con la matriz polimérica.

Tabla 3. Conductividad de los materiales compuestos, PSR y alótropos de carbono.

Material compuesto	Conductividad S/cm	Conductividad S/cm	Conductividad S/cm
	0,5%	1%	3%
PSR/CA	-	$1,93 \times 10^{-4}$	$6,55 \times 10^{-4}$
PSR/CR	-	-	-
PSR/CQ	-	-	-
PSR	$1,36 \times 10^{-14}$		
CA	$5,25 \times 10^{-5}$		
CR	-		
CQ	-		

(-) Límite fuera de la medición.

Hasta donde sabemos, existe poca información sobre materiales compuestos basados en PSR y CA. Sin embargo, se han desarrollado películas conductoras basadas en PS con óxido de grafeno para obtener un nanomaterial estable con capacidad conductora mejorada. Se dieron cuenta de que al agregar óxido de grafeno, el nanocompuesto logró obtener un valor de conductividad eléctrica de 8,16 S/cm, debido a las fuertes interacciones π - π entre ambos componentes, mejorando esto en un 30% con respecto a la resistividad eléctrica [38]. A pesar de que los valores en la literatura son superiores a nuestros resultados, se espera que la conductividad del CA puro sea menor que la del óxido de grafeno, ya que este presenta enlaces conjugados que promueven la carga entre partículas.

Conclusiones

Se prepararon con éxito materiales compuestos basados en PSR y alótropos de carbono. Se observó que la incorporación de alótropos de carbono (CA, CR y CQ) al PSR no afecta su estructura, sino que lo hace más estable térmicamente. Por otro lado, al analizar los ángulos de contacto de los materiales compuestos, se determinó que los alótropos favorecen el cambio de la naturaleza hidrófoba a hidrófila del PS, porque cuando estos se dispersan en la matriz polimérica transfieren la carga, permitiendo que el PS tienda a la hidrofiliidad debido a las interacciones π presentes entre los anillos aromáticos de los alótropos.

En cuanto a los resultados de conductividad eléctrica, se logró obtener un material compuesto con capacidad conductora mezclando PSR/CA al 1 y 3% con $1,93 \times 10^{-4}$ y $6,55 \times 10^{-4}$ S/cm, respectivamente. Estos materiales podrían utilizarse en futuros diseños que actualmente se encuentran en desarrollo, por ejemplo, se han diseñado fibras de PS decoradas con CA para la adsorción de tintes orgánicos contaminantes que se encuentran en aguas residuales, también se han desarrollado espumas PS/nanofibras de carbono como aislante térmico ahorro energético en diversas industrias.

Por otro lado, el reutilizar plásticos de un solo uso a partir de PS nos permite plantear una alternativa sostenible para ayudar a la reducir de la contaminación generada por este tipo de plástico, que hoy en día es un tipo de agente contaminante que se incrementó a partir de la pandemia de COVID-19. Además, si para desarrollar los materiales compuestos se utilizan tecnologías alternativas como el ultrasonido, se generan aún más beneficios a nivel medioambiental, lo que favorece los principios de la química verde, así como los objetivos establecidos por la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Autónoma de Coahuila, a la Facultad de Ciencias Químicas, a la Maestría en Ciencia y Tecnología Química, y también agradecemos la beca número 816345 otorgada por el CONAHCYT para el desarrollo de esta investigación, así como el apoyo brindado por el CONAHCYT a través del proyecto SEP-CONAHCYT Ciencias Básicas 2017-2018 CB2017-2018 A1-S-44977.

Referencias

- [1] Organisation for Economic Cooperation and Development, "Global Plastics Outlook", OECD iLibrary, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/global-plasticoutlook_c0821f81-en
- [2] O. Rivera, L. Álvarez, M. Rivas, O. Garelli, E. Pérez y N. Estrada, "Impact of plastic pollution in Mexican protected natural areas", Greenpeace México, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2021/05/5f6396a6-reporte-anual-2021.pdf>
- [3] W. Leal, A. Salvia, A. Minhas, A. Paco y C. Dias, "The COVID-19 pandemic and single-use plastic waste in households: A Science of the Total Environment preliminary study", *Science of The Total Environment*, vol. 793, nro. 1, pp. 2-3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148571>
- [4] L. Fuhr y M. Franklin, *PLASTIC ATLAS. Facts and figures from the world of Polymers*, Alemania, Heinrich Boll Stiftung, 2020.
- [5] A. Isobe y S. Iwasaki, "The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem?", *Science of The Total Environment*, vol. 825, nro. 153935, pp. 825, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153935>
- [6] P. Yose, G. Thondhlana y G. Fraser, "Conceptualizing the socio-cultural impacts of marine plastic pollution on human well-being - A perspective", *Marine Pollution Bulletin*, vol. 194, nro. 115285, p. 194, sept. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115285>
- [7] UNEP, *SINGLE-USE PLASTICS: A roadmap for sustainability*, 2018.
- [8] G. Castañeda, A. Gutiérrez, F. Nacaratte y C. Manzano, "Microplastics: a contaminant that grows in all environmental spheres, its characteristics, and possible risks to public health from exposure", *Bolivian Journal of Chemistry*, vol. 37, nro. 3, pp. 160-175, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.3.4>
- [9] T. Walker y L. Fequet, "Current trends of unsustainable plastic production and micro(nano)plastic pollution", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 160, nro. 116984, pp. 1-3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984>
- [10] D. Aldana, "Contaminación por microplásticos", *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, vol. 73, nro. 2, pp. 6-7, 2022.
- [11] J. W. Park, M. Kim, S. Kim, J. Bae y T. Kim, "Biodegradation of polystyrene by intestinal symbiotic bacteria isolated from mealworms, the larvae of *Tenebrio molitor*", *Heliyon*, vol. 9, nro. 6, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17352>
- [12] J. Segovia, R. Narro, F. Avalos y A. Sáenz, "Poliestireno, innovaciones emergentes y daños a la salud: dos caras de la misma moneda", *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 20, nro. 1, pp. 13-20, 2019.
- [13] M. Olivares, C. Galán y J. Roa, "Los composites: características

- y aplicaciones en la edificación”, *Informes de Construcción*, vol. 54, nro. 484, pp. 46–61, 2003. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>
- [14] N. Martín, “Z = 6, carbono, C El elemento químico más próximo al ser humano”, *Anales de química*, vol. 115, nro. 2, 2019.
- [15] L. Ramírez, A. Sáenz, L. López y P. González, “Nanomateriales poliméricos: Quitosán/ nanoestructuras de carbono”, *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, vol. 46, nro. 4, pp. 7–14, 2015.
- [16] E. Flores, “Polymeric compounds and their applications”, *Ciencia Cierta*, vol. 59, pp. 3–10, 2019.
- [17] K. Datta, P. Kumar y A. Rushi, “Introductory Chapter: Introduction to Carbon Nanotubes- Redefining the World of Electronics”, en *Carbon Nanotubes—Redefining the World of Electronics*. IntechOpen, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99112>
- [18] A. Filippín, N. Luna, M. Pozzi y J. Pérez, “Obtaining and characterization of activated carbon from olive and olive oil residues by physical activation”, *Advances in Science and Engineering*, vol. 8, nro. 3, pp. 59–71, 2017.
- [19] S. Baig, M. Ahmed, A. Batool, A. Bashir, S. Mumtaz, M. Ikram, M. Saeed, K. Shahzad, M. Umer Farooq y A. Maqsood, “Introductory Chapter: Brief Scientific Description to Carbon Allotropes. Technological Perspective”, en *Graphene—Recent Advances, Future Perspective and Applied Applications*. IntechOpen, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.107940>
- [20] E. Moreno Santos, “Activated carbon: generalities and applications”, *Ciencia Cierta*, vol. 66, nro. 91, 2021.
- [21] M. Carriazo, “Adsorptive properties of activated carbon and determination of the Langmuir equation using low-cost materials”, en *How to experience it. Chemical education*, vol. 21, pp. 224–229, 2010.
- [22] J. Garzón Posada, “Polymer matrix composite materials used for electromagnetic interference shielding”, *New Granada Science and Engineering*, vol. 27, nro. 1, pp. 5–26, 2017.
- [23] E. Abad y J. León, “Disinfectants and antiseptics against coronavirus: Synthesis of evidence and recommendations”, *Clinical Nursing*, vol. 31, nro. 1, pp. 84–88, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2020.05.013>
- [24] H. Niu, H. Yang y L. Tong, “Structural Characterization and Adsorption Capability of Carbonaceous Matters Extracted from Carbonaceous Gold Concentrate”, *Minerals*, vol. 11, nro. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11010023>
- [25] M. Servili, G. Veneziani, A. Taticchia, R. Romaniello, A. Tamborrioc y A. Leona, “Low-frequency, high-power ultrasound treatment at different pressures for olive paste: Effects on olive oil yield and quality”, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 59, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11010023>
- [26] A. Khataee, S. Rahim y A. Hassani, “Ultrasonic Nanotechnology: New insights into industrial and environmental Applications”, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 66, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104878>
- [27] B. Thamer, F. Al-aizari, H. Abdob y A. Al-Enizi, “Fibras de poliestireno electrohiladas decoradas con carbón activado para una eliminación altamente eficiente del peligroso tinte violeta cristal del agua”, *Coloides y superficies: Aspectos fisicoquímicos y de ingeniería*, vol. 688, nro. 133612, 2024.
- [28] POLISANTAFE, “POLISANTAFE”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://polisantafe.com.ar/el-plastico-transmite-electricidad/>. [Último acceso: 12/04/2024].
- [29] J. Zhao, G. Wang, W. Zhu, Z. Xu, A. Zhang, G. Dong y G. Zhao, “Espumas nanocompuestas de poliestireno/nanofibra de carbono ultraligeras, superaislantes y resistentes fabricadas mediante espuma microcelular”, *Revista Europea de Polímeros*, vol. 173, nro. 111261, jun. 2022.
- [30] S. Kentish, “Engineering Principles of Ultrasound Technology. In Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation”, Elsevier, vol. 1, pp. 1–13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804581-7.00001-4>
- [31] M. Medina, L. Galván y R. Reyes, “Las nanopartículas y el medio ambiente”, *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 19, nro. 74, mar. 2015.
- [32] M. Talha, H. Burak, H. Ulus, M. Okan, M. Emin y A. Avci, “Quasi-Static tensile loading performance of Bonded, Bolted, and hybrid Bonded-Bolted Carbon-to-Carbon composite Joints: Effect of recycled polystyrene nanofiber interleaving”, *Composite Structures*, vol. 323, nro. 117445, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117445>
- [33] F. Quiroz, P. Saltos, M. Aldas y J. Changó, “Recycling of expanded polystyrene by the dissolution precipitation method”, *Polytechnic Magazine*, vol. 36, nro. 2, sept. 2015.
- [34] L. Yang y W. Zhen, “Synthesis of Graphene Oxide-Polystyrene Graft Polymer Based on Reversible Addition Fragmentation Chain Transfer and Its Effect on Properties, Crystallization, and Rheological Behavior of Poly (Lactic Acid)”, *Advances in Polymer Technology*, pp. 1–16, ene. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/9364657>
- [35] J. Vega, F. Murillo y M. Esquivel, “L-poly(lactic acid (PLA) and multi-walled carbon nanotubes (NTCPM) with potential industrial applications”, *Revista Colombiana de Química*, vol. 50, nro. 1, pp. 20–39, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcq.v50n1.89838>
- [36] J. D. Rathnaraj, C. Dinesh, R. Velmurugan y A. Adithya, “Effect of particle size on TiO₂-polystyrene nanoparticles contact angle for hydrophobicity behavior”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 66, pp. 1107–1111, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.906>
- [37] H. Butt, J. Liu, K. Koynov, B. Straub, C. Hinduja, I. Roismann, R. Berger, X. Li, D. Vollmer, W. Steffen y M. Kappl, “Contact angle hysteresis”, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 59, nro. 101574, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2022.101574>
- [38] J. Shi, J. Wang, Z. Zhao y F. Dong, “Fabrication of reduced graphene oxide doped poly(3,4-ethylenedioxythiophene): Polystyrene (sulfonate-co-acrylic acid) conductive films with high conductivity and stability”, *Thin Solid Films*, vol. 762, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139525>

Citación del artículo:

A. R. Torres-Rodríguez, F. J. González-González, A. O. Castañeda-Facio y A. Sáenz-Galindo, “Materiales conductores eléctricos compuestos de poliestireno reciclado y alótropos amorfos de carbono”, *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 52, nro. 3, pp. 3–10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n3.112674>