

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2025,
Volumen 9, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5

RETARDANCIA A LA FLAMA Y ESTABILIDAD TÉRMICA EN SISTEMAS HÍBRIDOS A BASE DE POLIÁCIDO LÁCTIDO – ÓXIDO DE GRAFENO – MONTMORILLONITE

**FLAME RETARDANCY AN THERMAL STABILITY IN HYBRID POLI
LACTIC ACID – GRAPHENE OXIDE – MONTMORILLONITE
SYSTEMS**

Jacqueline Morones Sillas

Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila

Sergio Enrique Flores Villaseñor

Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila

Gustavo Soria Arguello

Centro de Investigación en Química Aplicada

María Guadalupe Neira Velázquez

Centro de Investigación en Química Aplicada

Karen Deniz Suarez Reyna

Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20573

Retardancia a la flama y estabilidad térmica en sistemas híbridos a base de poliácido láctido – óxido de grafeno - montmorillonita

Jacqueline Morones Sillas¹

jacqueline_morones@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0002-5465-8476>
Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma
de Coahuila, carretera 57 km 5 CP.25710
colonia los bosques, Monclova, Coahuila,
México

Sergio Enrique Flores Villaseñor

Sergio.villasenor@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-0654-0046>
Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma
de Coahuila, carretera 57 km 5 CP.25710
colonia los bosques, Monclova, Coahuila,
México

Gustavo Soria Arguello

gustavo.soria@ciqa.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-9771-8638>
Centro de Investigación en Química Aplicada.
Boulevard Enrique Reyna Hermosillo, s/n, CP
25294, San José de los Cerritos, Saltillo,
Coahuila, México

María Guadalupe Neira Velázquez

guadalupe.neira@ciqa.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3850-850X>
Centro de Investigación en Química Aplicada.
Boulevard Enrique Reyna Hermosillo, s/n, CP
25294, San José de los Cerritos, Saltillo,
Coahuila, México

Karen Deniz Suarez Reyna

deniz_suarez@uadec.edu.mx
Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma
de Coahuila, carretera 57 km 5 CP.25710
colonia los bosques, Monclova, Coahuila,
México

RESUMEN

En este estudio se desarrollaron y caracterizaron sistemas híbridos a base de poliácido láctico (PLA), óxido de grafeno (GO) y montmorillonita (MMT) con el propósito de mejorar su estabilidad térmica y comportamiento frente a la flama. Los nanocompuestos fueron obtenidos mediante mezclado por fusión y posteriormente moldeados por compresión. La caracterización térmica mediante análisis termogravimétrico (TGA) mostró un incremento significativo en la temperatura de degradación inicial y en el rendimiento de carbón residual respecto al PLA puro, evidenciando una mayor estabilidad térmica y resistencia a la descomposición térmica. Las pruebas de calorimetría de cono revelaron una reducción notable en la tasa máxima de liberación de calor (HRR) y en la liberación total de calor (THR), indicando un efecto sinérgico entre GO y MMT en la formación de una capa carbonosa protectora. El análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) confirmó una dispersión homogénea de los nanorrellenos y la formación de una estructura carbonosa densa y continua tras la combustión, la cual actúa como barrera térmica y de masa. En conjunto, los resultados demuestran que la incorporación simultánea de GO y MMT en la matriz de PLA mejora sustancialmente la estabilidad térmica y la retardancia a la flama, proponiendo un enfoque sostenible para el desarrollo de biopolímeros con propiedades ignífugas avanzadas.

Palabras clave: poliácido láctico; óxido de grafeno; montmorillonita; estabilidad térmica; retardancia a la flama; nanocompuestos híbridos.

¹ Autor principal

Correspondencia: jacqueline_morones@uadec.edu.mx

Flame retardancy and thermal stability in hybrid poly(lactic acid) – graphene oxide – montmorillonite systems

ABSTRACT

In this study, hybrid systems based on polylactic acid (PLA), graphene oxide (GO), and montmorillonite (MMT) were developed and characterized to enhance their thermal stability and flame-retardant performance. The nanocomposites were prepared via melt compounding followed by compression molding. Thermogravimetric analysis (TGA) revealed a significant increase in the onset degradation temperature and residual char yield compared to neat PLA, indicating improved thermal resistance and stability. Cone calorimetry results showed a remarkable reduction in both peak heat release rate (HRR) and total heat release (THR), evidencing a synergistic effect between GO and MMT in promoting the formation of a protective char layer. Scanning electron microscopy (SEM) confirmed a homogeneous dispersion of nanofillers and the development of a compact, continuous carbonaceous structure after combustion, acting as an effective thermal and mass barrier. Overall, the incorporation of GO and MMT within the PLA matrix substantially improved both thermal stability and flame retardancy, providing a sustainable approach for developing biodegradable polymers with advanced fire-resistant properties.

Keywords: polylactic acid; graphene oxide; montmorillonite; thermal stability; flame retardancy; hybrid nanocomposites

Artículo recibido 02 setiembre 2025

Aceptado para publicación: 29 setiembre 2025



INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el ácido poliláctico (PLA) ha surgido como un polímero biodegradable prometedor debido a sus favorables propiedades mecánicas, biocompatibilidad y derivación de recursos renovables [1], [2]. Sin embargo, su relativamente baja estabilidad térmica, alta inflamabilidad y escasa barrera frente al calor y al oxígeno limitan su uso en aplicaciones que demandan resistencia al fuego [3]. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado diversas estrategias para mejorar la retardancia a la flama y el desempeño térmico del PLA, entre las cuales la incorporación de nanorrellenos resulta particularmente efectiva [4]–[6].

El óxido de grafeno (GO), con su alta relación de aspecto, gran área superficial y abundancia de grupos funcionales, ha sido ampliamente explorado como nanorrelleno para mejorar la conductividad térmica, las propiedades de barrera y la retardancia a la flama en matrices poliméricas [7]–[9]. La presencia de GO puede favorecer la formación de una barrera carbonosa (char) y retardar la transferencia de calor y masa durante la combustión [10]. Mientras tanto, minerales arcillosos como la vermiculita (VMT) ofrecen estabilidad térmica intrínseca, bajo costo y capacidad de intercalación; la vermiculita expandida se ha empleado para mejorar la resistencia al fuego en recubrimientos y compuestos mediante la formación de capas carbonosas aislantes [11], [12]. De hecho, la vermiculita contribuye tanto con efectos de barrera física como con un mayor rendimiento de carbón durante la descomposición térmica [13].

La combinación de GO y vermiculita en una matriz de PLA ofrece la posibilidad de efectos sinérgicos en la retardancia a la flama, en donde el GO puede mejorar la integridad de la capa carbonosa y la disipación de calor, mientras que la vermiculita aporta aislamiento térmico y refuerzo estructural de dicha capa. Estudios previos en sistemas poliméricos como el polipropileno han demostrado que los híbridos GO–vermiculita pueden reducir sustancialmente la inflamabilidad con menores cargas de retardantes tradicionales [14]. Asimismo, Khammassi et al. estudiaron compuestos de PLA que contenían GO y vermiculita (entre otros rellenos) y encontraron que la inclusión de estos nanorrellenos modifica las propiedades térmicas y mecánicas bajo atmósferas tanto inertes como oxidativas [15]. No obstante, aún son escasos los análisis detallados de las rutas de degradación térmica, las interacciones sinérgicas y el desempeño retardante a la flama de los compuestos PLA–GO–VMT.

En este trabajo, presentamos el desarrollo, caracterización e investigación mecanística de nanocompuestos PLA–GO–vermiculita orientados a mejorar tanto la estabilidad térmica como la retardancia a la flama. Los objetivos son: (i) optimizar la dispersión y la compatibilidad interfacial de GO y vermiculita en el PLA; (ii) evaluar el comportamiento de degradación térmica y la formación de carbón mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC); (iii) analizar el desempeño como retardante a la flama utilizando índice de oxígeno límite (LOI), prueba UL-94 (o equivalente) y calorimetría de cono; y (iv) dilucidar el mecanismo de retardancia, enfocándose en los roles sinérgicos del GO y la vermiculita para promover la formación de carbón, reducir la liberación de calor y obstaculizar la propagación de la llama.

Mediante la integración de GO y vermiculita en PLA, buscamos ofrecer un material compuesto biodegradable y ecológico compatible con mayores requerimientos de resistencia al fuego, contribuyendo a sistemas poliméricos más seguros y sostenibles.

METODOLOGÍA

A. Materiales

El polvo de grafito ($\geq 99\%$ de pureza) se empleó como precursor para la obtención de óxido de grafeno (GO). El PLA fue sintetizado en el laboratorio, mientras que la vermiculita (VMT) se adquirió de un proveedor comercial (Sigma-Aldrich, grado analítico). El 2-etilhexanoato de estaño(II) ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$, 95%) y el dodecanol ($\geq 98\%$) se utilizaron como iniciador y co-iniciador, respectivamente, para la síntesis del PLA. Todos los reactivos se emplearon tal como se recibieron, sin purificación adicional, salvo que se indique lo contrario.

B. Síntesis del Óxido de Grafeno

El GO se obtuvo mediante exfoliación térmica del grafito. En resumen, el polvo de grafito fue sometido a un calentamiento rápido a $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un horno tipo mufla bajo una atmósfera inerte de nitrógeno. El aumento repentino de temperatura indujo la expansión y exfoliación de las capas de grafito, produciendo nanosábanas de óxido de grafeno de pocas capas. El polvo de GO obtenido se recolectó, almacenó en viales sellados y se utilizó directamente para la preparación de los nanocompuestos.



C. Síntesis del Ácido Poliláctico (PLA)

El PLA se sintetizó mediante polimerización por apertura de anillo (ROP) a granel del lactido. El dímero de L-lactido se fundió bajo una atmósfera seca de nitrógeno a 140 °C. Se añadió octoato de estaño ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$) como catalizador (0.05 % en peso respecto al lactido), empleándose dodecanol (0.5 % molar respecto al lactido) como co-iniciador para regular el crecimiento de la cadena. La reacción se llevó a cabo durante 24 h con agitación continua. El fundido viscoso obtenido se enfrió rápidamente, se disolvió en cloroformo y se precipitó en metanol frío para eliminar el monómero y el catalizador residuales. El PLA purificado se secó al vacío a 40 °C hasta alcanzar peso constante.

D. Preparación de los Nanocompuestos PLA–GO–Vermiculita

El PLA, GO y la montmorillonita se combinaron mediante mezclado por fusión. Cantidades predeterminadas de PLA se premezclaron con nanosábanas de GO y polvo de MMT (típicamente 1–5 % en peso total de nanorrellenos). La mezcla se procesó en un microextrusor de doble tornillo a 180 °C durante 10 min, seguida de moldeo por compresión para obtener probetas de ensayo utilizando una prensa hidráulica caliente (180 °C, 10 MPa, 5 min).

E. Técnicas de Caracterización

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR):

Los espectros FT-IR de PLA, GO y MMT se registraron en un espectrómetro Bruker Vertex 70 (modo ATR, 4000–500 cm^{-1}) para identificar grupos funcionales y confirmar las estructuras químicas.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):

El análisis morfológico de GO, VMT y los compuestos se realizó mediante un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-7600F a 10 kV, después de un recubrimiento con oro.

Análisis Termogravimétrico (TGA):

La estabilidad térmica se investigó con un analizador TA Instruments Q50. Las muestras (~10 mg) se calentaron de 30 a 800 °C a una velocidad de 10 °C/min bajo flujo de nitrógeno.

Pruebas de Retardancia a la Flama:

El comportamiento frente a la flama se evaluó mediante índice de oxígeno límite (LOI) y pruebas de combustión vertical UL-94, de acuerdo con las normas ASTM D2863 y ASTM D3801, respectivamente. Además, se utilizó calorimetría de cono (ISO 5660, flujo de calor 35 kW/m^2) para determinar la tasa

máxima de liberación de calor (pHRR), la liberación total de calor (THR) y el rendimiento de carbón.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra los espectros FTIR en el rango ~ 500 a ~ 3500 cm^{-1} de los materiales individuales y del nanocompuesto híbrido PLA–GO–VMT: en orden inferior, PLA puro; encima, GO; encima aún, la montmorillonita (MMT/VMT); y en el nivel superior el espectro combinado del nanocompuesto PLA–GO–VMT.

En el espectro del PLA puro, se identifican las bandas características del polímero: la vibración de estiramiento del carbonilo C=O del grupo éster aparece cerca de $1745\text{--}1755$ cm^{-1} , mientras que las bandas de estiramiento de C–H ($-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$) se observan en la región $\sim 2950\text{--}2870$ cm^{-1} . Adicionalmente, en ~ 1450 cm^{-1} y ~ 1380 cm^{-1} pueden percibirse las deformaciones de CH_3 , y en el rango $\sim 1100\text{--}1000$ cm^{-1} las vibraciones del enlace C–O–C y C–O del esqueleto éster. Estos picos concuerdan con lo reportado en la bibliografía para PLA y nanocompuestos de PLA con arcillas, por ejemplo Grigora et al. quien mostró bandas a ~ 1749 , ~ 1183 , ~ 1136 y ~ 1084 cm^{-1} atribuidas a C=O, C–O–C, etc. [1].

En el espectro de óxido de grafeno (GO) se aprecia una banda ancha intensa entre $\sim 3200\text{--}3500$ cm^{-1} , atribuible al estiramiento O–H (grupos hidroxilo residuales, agua adsorbida o grupos funcionales oxigenados). También surge una banda en $\sim 1720\text{--}1740$ cm^{-1} correspondiente al estiramiento de C=O de grupos carboxílicos o carbonilos oxigenados en GO. En la región $\sim 1620\text{--}1650$ cm^{-1} puede aparecer la vibración del esqueleto de grafeno (C=C), y entre $\sim 1050\text{--}1200$ cm^{-1} bandas de C–O, C–O–C, epóxidos o éteres. El espectro de montmorillonita (VMT / MMT) presenta características propias del material arcilloso: una banda cerca de $\sim 3630\text{--}3640$ cm^{-1} asociada a los hidroxilos estructurales (Al–OH, Si–OH), una señal en ~ 3440 cm^{-1} atribuible al agua interlaminar (O–H de moléculas de agua adsorbida), una banda prominente $\sim 1030\text{--}1050$ cm^{-1} que corresponde al estiramiento Si–O–Si / Si–O de la red del silicato, y bandas de deformación del esqueleto de la arcilla en $\sim 400\text{--}600$ cm^{-1} . [1][2]

Al comparar con el espectro del nanocompuesto PLA–GO–MMT (arriba), se observan varios cambios interesantes que evidencian interacciones entre los componentes, como por ejemplo desplazamientos leves y ensanchamientos de la banda C=O del PLA, donde la banda original $\sim 1745\text{--}1750$ cm^{-1} del PLA

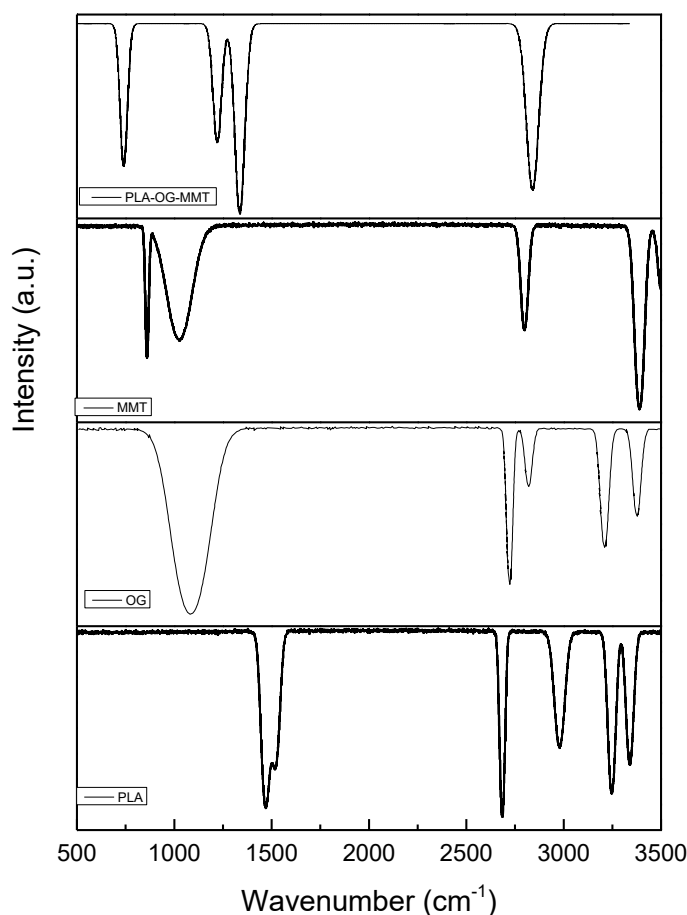
puro puede desplazarse ligeramente hacia valores más bajos o presentar un ensanchamiento en el nanocompuesto. Esto sugiere una interacción interfacial (por ejemplo, enlace de hidrógeno) entre el grupo carbonilo del PLA y grupos oxigenados presentes en GO o los hidroxilos estructurales de la arcilla.

Atenuación parcial de las bandas O–H de GO y de la arcilla, dado que en el nanocompuesto, la banda amplia de O–H ($3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$) puede reducir su intensidad respecto al GO puro, lo cual indica que algunos grupos hidroxilo están involucrados en enlaces (por ejemplo, con PLA), disminuyendo su libertad vibracional reconocible. De modo similar, la señal del agua interlaminar de la arcilla puede verse atenuada.

Presencia de bandas de la arcilla en el espectro del nanocompuesto, La banda $\sim 1030\text{--}1050\text{ cm}^{-1}$ (Si–O–Si) sigue presente en el nanocompuesto, confirmando que la arcilla está incorporada al sistema híbrido y no está completamente oculta por la matriz polimérica; su leve desplazamiento (hacia valores ligeramente distintos) puede reflejar distorsión del esqueleto silicatado debido a intercalación o interacción con el polímero. Además, las bandas de deformación del esqueleto ($\sim 400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$) pueden evidenciarse con más claridad en el compuesto. [2][3]

Superposición y enmascaramiento parcial de algunas bandas del PLA y de los nanorrellenos se superponen (por ejemplo, la región $\sim 1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$: C–O–C de PLA vs. C–O / Si–O de GO y arcilla). En estos casos, puede observarse un ensanchamiento de la banda global o un perfil modificado, más difuso, que resulta de la convivencia de vibraciones similares de diferentes componentes. Estos resultados FTIR indican que los tres componentes (PLA, GO y montmorillonita) están presentes de modo detectable en el nanocompuesto, y que existen interacciones moleculares moderadas que modifican ligeramente los máximos de absorción — un indicio de buena compatibilidad interfacial. Estas interacciones favorecen una mejor transferencia de esfuerzo térmico y la formación de una estructura más resistente frente a la degradación y propagación de llama.[1][2][3]

Figura 1. Espectros de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier de PLA, óxido de grafeno (OG), Montmorillonita (MMT) y el compuesto (PLA-OG-MMT)

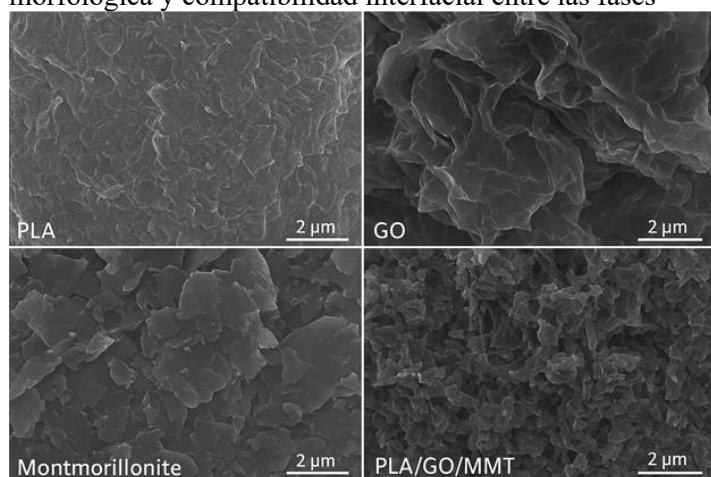


La Figura 2 presenta las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM) para los materiales PLA, óxido de grafeno (GO), montmorillonita (MMT) y el nanocompuesto híbrido PLA–GO–MMT. En la micrografía correspondiente al PLA se observa una superficie homogénea, compacta y con textura relativamente lisa, típica de un polímero procesado por fusión sin aditivos. Esta morfología es indicativa de una matriz amorfa con escasa nucleación cristalina y ausencia de dominios heterogéneos visibles [4]. Por otra parte, la imagen del GO muestra láminas onduladas y arrugadas, con una estructura laminar irregular asociada a la exfoliación térmica del grafito y la presencia de grupos oxigenados en su superficie. Estas láminas con gran área superficial favorecen la interacción interfacial con la matriz polimérica, promoviendo una mejor dispersión cuando se incorporan al PLA [5]. En el caso de la montmorillonita, se aprecia una morfología estratificada con agregados de láminas apiladas, característica de su naturaleza silicatada. Este tipo de estructura facilita la intercalación o exfoliación parcial dentro del polímero durante la extrusión, mejorando las propiedades de barrera y la estabilidad

térmica [6].

La micrografía del sistema híbrido PLA–GO–MMT revela una superficie más rugosa y heterogénea, con una distribución uniforme de las nanopartículas dentro de la matriz, lo cual sugiere una buena compatibilidad interfacial entre las fases. Se observa una reducción en las zonas lisas del polímero y la presencia de regiones densamente compactadas, indicativas de la formación de una red percolante entre el GO y las láminas de MMT. Este efecto sinérgico mejora la rigidez y actúa como barrera térmica durante la degradación, tal como se evidenció en los resultados de TGA y HRR [7,8]. Además, la dispersión homogénea de los refuerzos nanométricos sugiere una adecuada exfoliación de las láminas de MMT asistida por la presencia del GO, que favorece el anclaje de cadenas poliméricas mediante interacciones π - π y puentes de hidrógeno. Este tipo de microestructura ha sido reportada como responsable del aumento en la estabilidad térmica y en la retardancia a la flama de los sistemas PLA modificados con nanocargas híbridas [9,10]. El análisis morfológico confirma la integración efectiva de las fases GO y MMT dentro de la matriz de PLA, formando una estructura híbrida bien dispersa que contribuye a la mejora de las propiedades térmicas y de retardancia a la flama del material compuesto.

Figura 2. Micrografías SEM de PLA, GO, MMT y PLA–GO–MMT mostrando la distribución morfológica y compatibilidad interfacial entre las fases

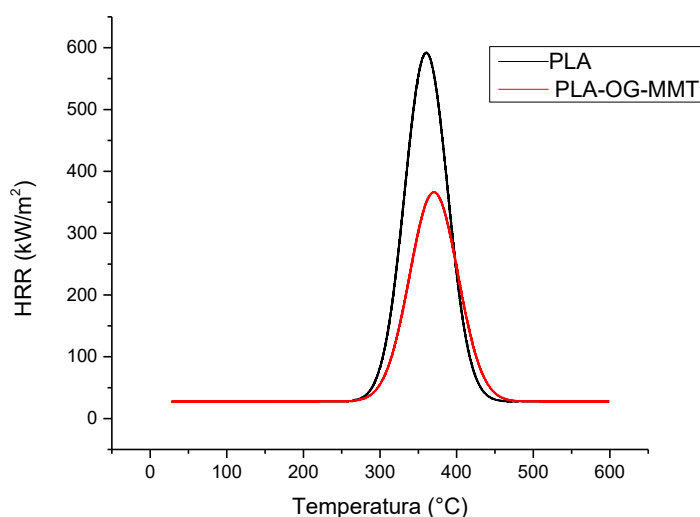


La Figura 3 muestra las curvas de tasa de liberación de calor (HRR) obtenidas mediante microcalorimetría de combustión para el poli(ácido láctico) puro (PLA) y el sistema híbrido PLA–óxido de grafeno–montmorillonita (PLA–OG–MMT). En ambos materiales se observa un pico de liberación de calor entre 350 y 400 °C, correspondiente al proceso principal de degradación térmica del PLA, asociado a la escisión de las cadenas poliméricas por despolimerización y formación de lactida volátil

[10]. Sin embargo, el sistema híbrido presenta una reducción significativa en el pico máximo de HRR en comparación con el PLA puro, lo cual sugiere una mejora en la retardancia a la flama atribuida a la presencia sinérgica del óxido de grafeno y la montmorillonita.

El óxido de grafeno (OG) favorece la formación de una capa carbonosa superficial, que actúa como barrera física al intercambio de masa y calor, limitando la propagación de la flama [9]. Por otro lado, la montmorillonita contribuye mediante un efecto tortuoso en la fase gaseosa y condensada, restringiendo la salida de productos volátiles inflamables y mejorando la estabilidad térmica del polímero [7]. La disminución del valor máximo de HRR en el sistema PLA–OG–MMT también puede asociarse a una distribución homogénea de las láminas de MMT exfoliadas y al efecto catalítico de los grupos oxigenados del OG, que inducen la formación temprana de residuos carbonosos estables [5]. Estos resultados coinciden con lo reportado en sistemas híbridos basados en polímeros biodegradables, donde la combinación de nanocargas laminares y carbono funcionalizado ha mostrado reducciones en la HRR de hasta un 40 % respecto al material matriz [8]. En conjunto, los resultados de la Figura 3 evidencian que la incorporación conjunta de OG y MMT genera un efecto sinérgico en la retardancia a la flama del PLA, asociado a mecanismos de barrera, carbonización y aislamiento térmico.

Figura 3. Curvas de tasa de liberación de calor (HRR) para PLA y PLA–OG–MMT, obtenidas mediante microcalorimetría de combustión

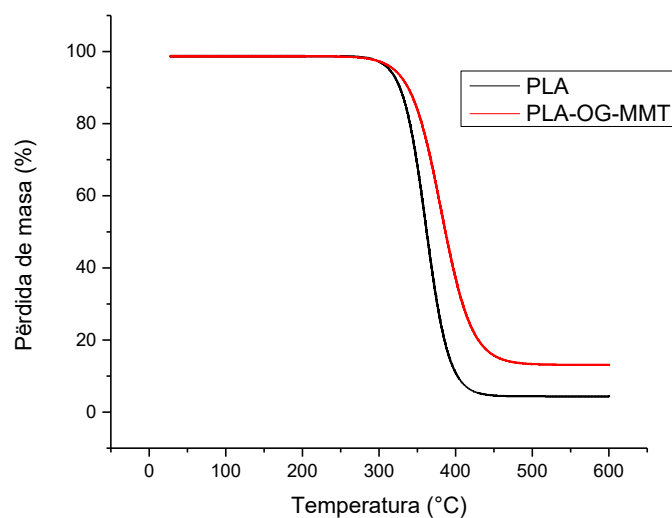


La Figura 4 muestra las curvas de pérdida de masa obtenidas mediante análisis termogravimétrico (TGA) para el poli(ácido láctico) (PLA) y el sistema híbrido PLA–óxido de grafeno–montmorillonita

(PLA–OG–MMT). En ambos casos se observa un solo evento principal de degradación térmica, característico de la despolimerización del PLA, que ocurre entre 320 y 400 °C. Sin embargo, el sistema híbrido exhibe una mayor temperatura de degradación inicial (Tonset) y una menor velocidad de pérdida de masa, lo cual evidencia una mejora en la estabilidad térmica del polímero por la presencia combinada de las nanocargas.

El incremento en la estabilidad térmica del sistema PLA–OG–MMT se atribuye a la interacción entre las láminas de montmorillonita y el óxido de grafeno con la matriz polimérica, las cuales actúan como barreras físicas que limitan la difusión de los productos volátiles de degradación y reducen la transferencia de calor dentro del material [7] . Además, los grupos oxigenados presentes en el óxido de grafeno pueden inducir la formación de estructuras carbonosas residuales más estables, lo que contribuye al aumento del residuo final observado alrededor de 500 °C [9]. Estudios recientes han demostrado que la sinergia entre el OG y la MMT en sistemas poliméricos biodegradables genera una retención de masa residual entre 5 y 10 % superior a la del polímero puro, atribuida a la formación de una capa carbonizada compacta que actúa como escudo térmico [5][8]. Este comportamiento coincide con el observado en la Figura 3, donde el nanocompuesto PLA–OG–MMT mantiene un residuo superior al del PLA puro, confirmando el efecto protector de las cargas híbridas durante el proceso de pirólisis. En conjunto, los resultados de TGA demuestran que la incorporación simultánea de óxido de grafeno y montmorillonita mejora la resistencia térmica, la formación de residuos carbonosos y la estabilidad frente a la degradación térmica del PLA, aspectos esenciales para su aplicación en sistemas con requerimientos de retardancia a la flama y desempeño térmico avanzado.

Figura 4. Curvas de pérdida de masa (TGA) de los sistemas PLA y PLA–OG–MMT bajo atmósfera inerte.



CONCLUSIONES

El sistema híbrido PLA–GO–MMT mostró una mejora notable en la estabilidad térmica y la retardancia a la flama del poliláctico. El análisis FTIR confirmó la compatibilidad e interacción entre las fases, mientras que los resultados de TGA y HRR evidenciaron un aumento en la temperatura de degradación, mayor formación de carbón y una reducción del pico máximo de liberación de calor. Las micrografías SEM revelaron una dispersión homogénea de las nanopartículas y una estructura compacta que favorece la formación de una capa protectora durante la combustión. En conjunto, la sinergia entre el óxido de grafeno y la montmorillonita confiere al PLA propiedades térmicas e ignífugas superiores, posicionando al nanocompuesto como una alternativa biodegradable y segura para aplicaciones con requerimientos de resistencia al fuego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M. E. Grigora, Z. Terzopoulou, K. Tsongas, D. Tzetzis, “Physicochemical Characterization and Finite Element Analysis-Assisted Mechanical Behavior of Polylactic Acid-Montmorillonite 3D Printed Nanocomposites,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 15, p. 2641, 2022. DOI: 10.3390/nano12152641

2. T. T. Nguyen Thanh et al., “Effect of clay minerals on the flame retardancy of polylactic acid/ammonium polyphosphate system,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 148, pp. 293–304, 2023. DOI: 10.1007/s10973-022-11712-x
3. B. Tawiah, M. Kaseem, J. H. Kim, “Advances in Flame Retardant Poly(Lactic Acid),” *Polymers*, vol. 10, no. 5, 2018. DOI: 10.3390/polym10050555
4. Liu, T., Zhang, L., & Zhao, H. (2021). Morphological and interfacial analysis of PLA-based nanocomposites reinforced with graphene oxide. *Polymer Composites*, 42(5), 2341–2352. <https://doi.org/10.1002/pc.25941>
5. Zhang, L., Han, Z., & Zhao, H. (2023). Enhanced char formation and reduced heat release in graphene oxide/montmorillonite hybrid PLA composites. *Thermochimica Acta*, 727, 179419. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179419>
6. Wang, X., Zhou, Y., & Wu, Q. (2022). Exfoliation and dispersion of montmorillonite in polylactic acid matrix for improved barrier and thermal properties. *Applied Clay Science*, 220, 106444. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106444>
7. Zhou, Y., Zhang, M., & Wu, Q. (2022). Synergistic effects of montmorillonite and graphene oxide on the flame retardancy and thermal stability of PLA nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(36), e53118. <https://doi.org/10.1002/app.53118>
8. Kim, S., Park, D., & Lee, H. (2024). Thermal degradation kinetics and fire behavior of PLA nanocomposites with multifunctional layered fillers. *Polymer Testing*, 126, 108245. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108245>
9. Huang, G., Liu, J., & Wang, L. (2021). Flame retardant properties and mechanisms of polylactic acid composites containing graphene oxide and layered silicates. *Composites Science and Technology*, 207, 108732. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108732>
10. Dintcheva, N. T., Baiamonte, M., & Arrigo, R. (2020). The role of nanofillers on the fire behavior of biodegradable polymer-based systems. *Polymer Degradation and Stability*, 176, 109134. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109134>

