



## Versatilidad de la técnica termogravimetría acoplada a espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (TGA-FTIR) en el análisis de materiales de diversa naturaleza

## Versatility of thermogravimetry coupled with Fourier transform infrared spectroscopy (TGA-FTIR) for the characterization of diverse materials

Palacio, Magdalena<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de La Plata, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

\*[mpalacio@quimica.unlp.edu.ar](mailto:mpalacio@quimica.unlp.edu.ar)

### Resumen

La técnica de Análisis Termogravimétrico acoplada con Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (TGA-FTIR) se ha consolidado como una herramienta analítica poderosa y versátil para el estudio integral de materiales orgánicos e inorgánicos. Su capacidad para correlacionar la pérdida de masa con la evolución de productos gaseosos permite obtener información simultánea sobre los procesos térmicos y la composición química de las especies volátiles. Esta combinación resulta particularmente útil en estudios de descomposición, síntesis, catálisis y evaluación de estabilidad térmica.

En este trabajo se presenta una selección de casos de aplicación de la técnica sobre muestras de diversa naturaleza, procesadas en el marco del Servicio Tecnológico de Alto Nivel (STAN N° 4393). Se recopilaron trabajos desarrollados por diferentes grupos de investigación que han recurrido al servicio, con el objetivo de evidenciar la versatilidad, precisión y alcance del acoplamiento TGA-FTIR como herramienta para la caracterización avanzada de materiales.

**Palabras clave:** análisis térmico; espectroscopía infrarroja; TGA-FTIR; caracterización de materiales; procesos térmicos.





## Abstract

The Thermogravimetric Analysis technique coupled with Fourier Transform Infrared Spectroscopy (TGA-FTIR) has become a powerful and versatile analytical tool for the comprehensive study of organic and inorganic materials. Its ability to correlate mass loss with the evolution of gaseous products enables the simultaneous acquisition of information regarding thermal processes and the chemical composition of volatile species. This combination is particularly useful in studies of decomposition, synthesis, catalysis, and thermal stability assessment.

This work presents a selection of application cases of the technique on samples of diverse nature, analyzed within the framework of the High-Level Technological Service (STAN No. 4393). Studies carried out by different research groups that have used the service were compiled in order to demonstrate the versatility, precision, and scope of the TGA-FTIR coupling as a tool for advanced material characterization.

**Keywords:** Thermal analysis; infrared spectroscopy; TGA-FTIR; material characterization; thermal processes.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge de la experiencia profesional en el ámbito del servicio analítico, donde se emplean las técnicas TGA (Análisis Termogravimétrico) y FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier) de manera acoplada para el estudio de materiales de diversa naturaleza. La sinergia entre ambas técnicas permite correlacionar la pérdida de masa de una muestra con la evolución de productos gaseosos, brindando información simultánea sobre los fenómenos térmicos y la composición química de las especies volátiles.

Esta capacidad analítica resulta particularmente valiosa en estudios de descomposición, síntesis, catálisis y evaluación de estabilidad térmica. El objetivo principal del presente trabajo es evidenciar la versatilidad del uso combinado de ambas técnicas a partir del análisis de muestras de distinto origen estudiadas en el Servicio TGA-FTIR (STAN N° 4393). A través de una selección de trabajos científicos recientes que han hecho uso del servicio, se busca mostrar cómo el acoplamiento TGA-FTIR permite obtener información integral sobre la composición de los materiales y su comportamiento térmico, ampliando así las posibilidades de interpretación y aplicación en diferentes campos científicos y tecnológicos.

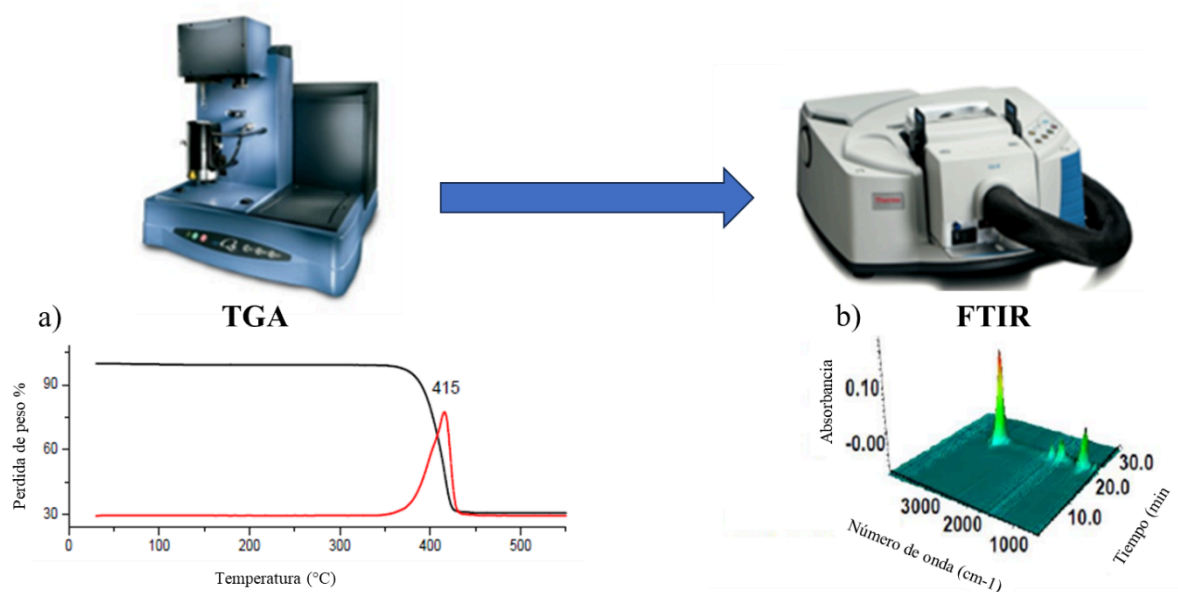
Cuando se emplean simultáneamente, TGA y FTIR posibilitan el análisis coordinado de los cambios físico-químicos que experimenta un material bajo tratamiento térmico. Mientras la TGA cuantifica la pérdida de masa en función de la temperatura, el FTIR permite identificar los gases desprendidos mediante su huella espectral. Esta integración metodológica resulta especialmente útil para estudiar procesos complejos, ya que proporciona información térmica, cinética y estructural en un solo análisis.

La presente revisión recoge ejemplos concretos del uso de TGA-FTIR en el estudio de polímeros, residuos industriales, biomasa, materiales funcionales, adsorbentes y catalizadores. A través de ellos se pone de manifiesto la amplitud de sus aplicaciones y su relevancia como herramienta para la caracterización avanzada de materiales en contextos de investigación y desarrollo orientados hacia la sostenibilidad y la innovación tecnológica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Equipamiento

Los análisis se realizaron mediante la técnica acoplada de análisis termogravimétrico y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (TGA-FTIR). Se utilizó una termobalanza TA Instruments modelo Q50, conectada a un espectrómetro FTIR Thermo Scientific modelo Nicolet iS10, equipado con un detector DTGS y ventanas de KBr, que permiten el paso de radiación en el rango espectral de interés. (Fig. 1)



**Figura 1.** a) Termograma y b) serie de espectros FTIR de una muestra de polietileno comercial.

Esta metodología permite establecer una correlación directa entre los eventos de pérdida de masa detectados por TGA y la composición de los gases identificados por FTIR, brindando así un análisis integral de los fenómenos térmicos y químicos involucrados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Aplicaciones de la técnica acoplada TGA-FTIR en el análisis de materiales diversos

Las técnicas acopladas TGA-FTIR han demostrado ser una herramienta integral para el estudio de materiales orgánicos e inorgánicos, tanto en investigación como en aplicaciones industriales. Su mayor fortaleza radica en la capacidad para combinar información térmica y espectroscópica en tiempo real, lo que permite correlacionar la pérdida de masa con la identificación de compuestos volátiles durante procesos térmicos.

Esta metodología es especialmente útil para analizar polímeros, residuos industriales, biomasa, materiales funcionales, adsorbentes y catalizadores, entre otros, proporcionando datos fundamentales para comprender mecanismos de descomposición, evaluar la eficiencia de procesos y optimizar condiciones operativas. Asimismo, su aplicación resulta clave en estrategias de valorización de residuos, permitiendo detectar productos de interés y minimizar la formación de compuestos tóxicos.

En los apartados siguientes, se presentan casos representativos del uso de TGA-FTIR en distintos materiales, evidenciando su versatilidad y su aporte al desarrollo de tecnologías más limpias y sostenibles.

##### *1. Análisis de polímeros en procesos de reciclado químico: pirólisis y cracking catalítico*

La técnica TGA-FTIR ha permitido avanzar significativamente en el estudio de polímeros termoplásticos como el polietileno (PE) y poliestireno (PS) en procesos de reciclado químico, incluyendo pirólisis térmica y catalítica y cracking catalítico [1,2].

En la caracterización del polietileno, la técnica facilitó la identificación de gases emitidos en distintas etapas térmicas, tales como hidrocarburos ligeros, CO<sub>2</sub>, CO y compuestos oxigenados (Fuentes *et al.*, 2019). Esta información es fundamental para evaluar la actividad y selectividad de catalizadores y para optimizar las condiciones operativas, buscando minimizar la generación de subproductos no deseados.



En cuanto al poliestireno, estudios recientes demostraron que el uso de catalizadores puede reducir la formación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), considerados contaminantes (Fuentes *et al.*, 2021). El acoplamiento TGA-FTIR permitió correlacionar las etapas térmicas con la evolución de dichos compuestos, destacando la utilidad de esta técnica para desarrollar procesos de reciclado más sostenibles.

## 2. Aplicación de TGA-FTIR en la pirólisis catalítica de neumáticos fuera de uso

Los neumáticos fuera de uso constituyen un residuo industrial complejo cuya valorización mediante pirólisis catalítica se beneficia notablemente del uso de TGA-FTIR. Esta técnica permite caracterizar simultáneamente la descomposición térmica y la emisión de gases, facilitando la evaluación integral del proceso.

En estudios realizados con catalizadores metálicos como Ni, Co y Pd soportados en SiO<sub>2</sub>, se identificaron etapas térmicas críticas y se determinaron parámetros cinéticos, mientras que el FTIR detectó hidrocarburos alifáticos y aromáticos, compuestos oxigenados, nitrogenados y sulfurados. La correlación entre pérdida de masa y naturaleza de los gases evidenció la influencia del catalizador en la formación de productos valiosos (limoneno, isopreno) y en la reducción de contaminantes. (Osorio-Vargas *et al.*, 2021a; Osorio-Vargas *et al.*, 2021b)

Este conocimiento es esencial para optimizar condiciones operativas, mejorar la eficiencia y selectividad del proceso, y desarrollar tecnologías sustentables para la gestión de residuos industriales complejos.

## 3. Valorización de biomasa lignocelulósica y producción de biochar mediante TGA-FTIR

La biomasa lignocelulósica representa una fuente renovable con gran potencial para la obtención de productos químicos, energéticos y materiales carbonosos de valor agregado. La caracterización térmica y química de estos materiales resulta fundamental para optimizar su transformación y comprender los mecanismos involucrados en procesos de pirólisis, carbonización e hidrogenación catalítica.

En el análisis de festuca cruda y pre tratada con ácido fosfórico, la técnica TGA-FTIR permitió identificar las etapas de degradación térmica de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como detectar la liberación de grupos funcionales como carbonilos, ácidos carboxílicos y compuestos furánicos (Musci *et al.*, 2022). Esta información integral facilitó evaluar el efecto del pretratamiento sobre la composición y reactividad de la biomasa. Los datos obtenidos orientaron procesos posteriores de pirólisis e hidrogenación catalítica para la producción de compuestos de valor agregado como biofurfural, subrayando el papel de TGA-FTIR en estrategias de valorización térmica de biomasa.

Asimismo, la técnica ha sido aplicada al estudio comparativo de residuos lignocelulósicos como bagazo cervecero, residuos de poda y biomasa leñosa, permitiendo analizar simultáneamente la degradación térmica y la evolución de gases durante la pirólisis (Sampaolesi *et al.*, 2026).

Mediante el acoplamiento TGA-FTIR fue posible identificar compuestos volátiles tales como CO<sub>2</sub>, CO, hidrocarburos y especies oxigenadas, correlacionando la pérdida de masa con la composición gaseosa y evidenciando diferencias en la reactividad térmica y en la distribución de productos generados por cada biomasa.

Además, el análisis termoanalítico permitió evaluar la estabilidad térmica y el potencial de formación de biochar, aportando información relevante para optimizar condiciones operativas y estrategias de valorización energética. Estos resultados destacan la importancia de TGA-FTIR como herramienta integral para el desarrollo de tecnologías sostenibles orientadas al aprovechamiento de residuos lignocelulósicos y la producción de materiales carbonosos funcionales.

## 4. Materiales funcionales y adsorbentes

En la caracterización de materiales adsorbentes híbridos, como fosfato de calcio y quitosano (Lobo *et al.*, 2024), el uso combinado de TGA y FTIR ha sido crucial para evaluar estabilidad térmica y detectar grupos funcionales activos durante la adsorción. Aunque no siempre se emplea un acoplamiento simultáneo, la



integración de ambas técnicas permite analizar cambios estructurales y funcionales durante tratamientos térmicos.

Estos estudios contribuyen a ajustar condiciones de operación y prever el desempeño de los adsorbentes en aplicaciones reales, como el tratamiento de aguas contaminadas con fluoruro u otros aniones, optimizando eficiencia y durabilidad.

#### 5. *Catalizadores y materiales fotocatalíticos*

La técnica TGA-FTIR ha sido ampliamente utilizada para caracterizar catalizadores heterogéneos y fotocatalizadores, especialmente en etapas de síntesis, activación térmica y evaluación de estabilidad. Permite monitorear degradación térmica y liberación de compuestos volátiles, correlacionando eventos térmicos con cambios estructurales o químicos esenciales para el diseño racional de materiales funcionales.

En fotocatalizadores basados en carbón activado y óxidos metálicos dopados, TGA-FTIR ha ayudado a evaluar eliminación de residuos orgánicos post-síntesis, confirmar presencia de precursores y caracterizar la superficie activa, lo cual es clave para determinar temperaturas óptimas de activación y estabilidad.

Estudios complementarios, como el de Manrique-Holguín et al. (2024) en TiO<sub>2</sub> dopado con nitrógeno, integraron técnicas espectroscópicas y estructurales para correlacionar composición química y actividad, evidenciando que la absorción en visible no siempre se traduce en mayor actividad fotocatalítica.

Además, investigaciones como las de Alvear-Daza et al. (2025), reconocen el valor de las técnicas acopladas para optimizar activación y funcionalización de materiales porosos, destacando la técnica como herramienta fundamental en el desarrollo de fotocatalizadores más eficientes y sostenibles.

#### 6. *Catalizadores soportados para procesos de hidrogenólisis y valorización de compuestos oxigenados*

La técnica TGA-FTIR también ha demostrado ser una herramienta valiosa en el estudio de catalizadores soportados empleados en procesos de valorización de compuestos derivados de biomasa, particularmente en reacciones de hidrogenólisis de glicerol. En este contexto, trabajos recientes sobre catalizadores de Pt soportados en sílice mesoporosa modificada con heteropoliácidos permitieron correlacionar propiedades térmicas y superficiales con el desempeño catalítico en la producción simultánea de 1,3-propilenglicol y 1-propanol (Gatti *et al.*, 2025).

El uso de TGA-FTIR posibilita monitorear la estabilidad térmica de los materiales catalíticos, evaluar la descomposición de especies precursoras y detectar la evolución de compuestos volátiles generados durante etapas de síntesis, activación o reacción. Asimismo, la identificación de residuos orgánicos y especies adsorbidas contribuye a comprender fenómenos de desactivación, formación de coque y modificación de sitios activos.

Estos estudios evidencian la importancia de las técnicas acopladas en el diseño racional de catalizadores heterogéneos más eficientes y selectivos para procesos de conversión de biomasa y producción de compuestos de alto valor agregado.

## 4. CONCLUSIONES

La técnica TGA-FTIR se consolida como una herramienta multidisciplinaria y altamente versátil, con capacidad para adaptarse a la caracterización de materiales con composiciones y propiedades muy diversas. Su aplicación se extiende desde plásticos y residuos agroindustriales hasta materiales funcionales, adsorbentes y catalizadores. La posibilidad de obtener información simultánea sobre los cambios térmicos y la composición gaseosa convierte a esta técnica en un recurso fundamental tanto para la investigación científica como para la enseñanza de la química experimental. En un contexto donde



el análisis integral, la sostenibilidad y la revalorización de residuos cobran cada vez mayor importancia, TGA-FTIR ofrece una metodología robusta, flexible y con amplio potencial de aplicación.

## Agradecimientos

Se agradece a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) por el apoyo institucional y financiero brindado.

## Referencias

- Alvear-Daza, J. J., Melin, V., Irvicelli, K., Murillo-Sierra, J. C., Canneva, A., Donadelli, J. A., Campos, C. H., Torres, C. C., Contreras, D., Celzard, A., Fierro, V., Pizzio, L. R. y Rengifo-Herrera, J. A. (2025). Metal-free photocatalyst based on highly porous activated carbon obtained from agro-industrial residues. Characterization and photocatalytic evaluation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 462, 116247. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116247>
- Fuentes, C., Vázquez, P. y Sambeth, J. E. (18-20 de septiembre de 2019). *Análisis del cracking catalítico de polietileno por la técnica TGA-FTIR* [ponencia]. XXI Congreso Argentino de Catálisis y X Congreso de Catálisis del Mercosur. Santa Fe, Argentina.
- Fuentes, C., Colman Lerner, E., Vázquez, P. y Sambeth, J. E. (2021). Analysis of the emission of PAH in the thermal and catalytic pyrolysis of polystyrene. *Catalysis Today*, 372, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.11.030>
- Gatti, M. N., Sosa, A., Rubert, A. A., Pizzio, L. R. y Pompeo, F. (2025). Simultaneous production of 1,3-propylene glycol and 1-propanol through glycerol hydrogenolysis: Pt catalysts supported on heteropolyacids-modified mesoporous silica. *Applied Catalysis A: General*, 705, 120439. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2025.120439>
- Lobo, C. C., Colman Lerner, J. E., Bertola, N. C. y Zaritzky, N. E. (2024). Synthesis and characterization of functional calcium-phosphate-chitosan adsorbents for fluoride removal from water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130553. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130553>
- Manrique-Holguin, M., Alvear-Daza, J. J., Murillo Sierra, J. C., Irvicelli, K. G., Canneva, A., Donadelli, J. A., Valencia, H. A., Melin, V., Campos, C. H., Torres, C. C., Pizzio, L. R., Contreras, D. y Rengifo-Herrera, J. A. (2024). Visible light absorption is not always related to N-Doped TiO<sub>2</sub> and high photocatalytic activity in materials synthesized by the Sol-Gel method using urea and ammonia as precursors. *The Journal of Physical Chemistry C*, 128(13), 5597–5610. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c01175>
- Musci, J. J., Casoni, A. I., Gutiérrez, V. S., Ocsachoque, M. A., Merlo, A. B., Volpe, M. A., Lick, I. D. y Casella, M. L. (2022). Upgrading of tall fescue grass pyrolytic bioliquid and catalytic valorization of the biofurfural obtained. *ChemistrySelect*, 7, e202202233. <https://doi.org/10.1002/slct.202202233>
- Osorio-Vargas, P., Lick, I. D., Sobrevía, F., Correa-Muriel, D., Menares, T., Manrique, R., Casella, M. L. y Arteaga-Pérez, L. E. (2021). Thermal behavior, reaction pathways and kinetic implications of using a Ni/SiO<sub>2</sub> catalyst for waste tire pyrolysis. *Waste Biomass Valorization*, 12, 6465–6479. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-232987/v1>
- Osorio-Vargas, P., Menares, T., Lick, I. D., Casella, M. L., Romero, R., Jiménez, R. y Arteaga-Pérez, L. E. (2021). Tuning the product distribution during the catalytic pyrolysis of waste tires: The effect of the nature of metals and the reaction temperature. *Catalysis Today*, 372, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.10.035>
- Sampaolesi, S., Lick, I. D., Musci, J. J., Casella, M. L. y Briand, L. E. (2026). Pyrolysis of lignocellulosic based waste: Comparison of brewer's spent grain, tree pruning and woody biomass. *Biomass and Bioenergy*, 210, 109059. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109059>