VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Caracterización de la Respuesta Termoluminiscente del Grafito

Characterization of the Thermoluminescent Response of Graphite

Laila Nadchieli Aguilar Vichido [1], Mirella Valentina Mejia Velazquez [1], Fatima Joseline Arriola Patiño [1], Mtra. Jessica Paola Córdova Fraga[1], Dr. Modesto Sosa Aquino[1]
[1]Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías
ln.aguilarvichido@ugto.mx, mv.mejiavelazquez@ugto.mx, j.arriolapatino@ugto.mx, jessicasanluis99@gmail.com, modesto@fisica.ugto.mx

Resumen

La termolumiscencia (TL) es una técnica empleada en dosimetría, ya que algunos materiales pueden almacenar energía después de ser expuestos a radiación ionizante y liberarla posteriormente como emisión luminosa durante un calentamiento controlado. Los materiales basados en grafito son de interés dosimétrico debido a su bajo costo, disponibilidad, estabilidad térmica y composición rica en carbono, lo que los hace candidatos atractivos para el desarrollo de detectores pasivos de radiación. En este trabajo se evaluó de forma preliminar la respuesta TL de pastillas de grafito dopado con sal de cocina comercial, empleada como fuente mayoritaria de cloruro de sodio (NaCl), con una concentración aproximada de 7.3 % en masa. Se compararon dos matrices de grafito, una de grado técnico y otra de grado analítico. Las muestras fueron caracterizadas mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y posteriormente irradiadas con electrones de 18 MeV y fotones de 6 MV, ambas condiciones a una dosis nominal de 1 Gy. Las curvas TL fueron corregidas mediante sustracción del ruido instrumental y normalizadas respecto a la masa de cada pastilla. El grafito técnico dopado con sal de cocina no mostró una respuesta TL definida, mientras que el grafito analítico presentó curvas de brillo distinguibles. La muestra irradiada con electrones mostró la mayor respuesta, con una integral corregida normalizada de 1707.3 cuentas/mg, superior a la referencia sin irradiar, que presentó 724.8 cuentas/mg. En contraste, la muestra irradiada con fotones presentó una señal menor y sensible a la corrección de fondo. Estos resultados sugieren que el grafito analítico dopado con sal de cocina presenta una respuesta TL preliminarmente más favorable ante electrones de 18 MeV bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, la señal basal observada en la muestra sin irradiar indica la necesidad de implementar protocolos de borrado térmico reproducibles, repeticiones experimentales y controles dosimétricos antes de proponer su uso como dosímetro TL.

Palabras clave: termoluminiscencia, dosimetría, FTIR, grafito, NaCl, dosimetría, electrones, fotones.

1. Introducción

La termoluminiscencia (TL) es un fenómeno físico que consiste en la emisión de luz por parte de un material previamente irradiado cuando es sometido a un calentamiento controlado. Esta emisión se origina cuando los portadores de carga (electrones y huecos) que habían sido atrapados en defectos de la red cristalina (trampas) adquieren suficiente energía térmica para escapar y recombinarse en centros de luminiscencia, liberando fotones. [1,2]

La respuesta TL de un material depende de múltiples factores, entre los que destacan su estructura cristalina, la presencia de impurezas, su historial térmico y las condiciones específicas de irradiación [3,4]. En este contexto, la búsqueda de nuevos materiales dosimétricos que ofrezcan ventajas como bajo costo, disponibilidad, facilidad de manejo y alta sensibilidad ha motivado numerosos estudios. Materiales como el fluoruro de litio (LiF), el sulfato de calcio dopado con disprosio ($CaSO_4$:Dy) o el óxido de aluminio (Al_2O_3:C) son ampliamente utilizados en dosimetría TL; sin embargo, suelen requerir procesos de fabricación complejos o presentar limitaciones en cuanto a resolución espacial o rango de respuesta. [6]

Recientemente, el grafito ha despertado interés como posible material dosimétrico debido a su estructura carbonosa, su disponibilidad, su bajo costo y su potencial para ser utilizado en aplicaciones de dosimetría

cutánea y de epitelio [5,6]. Por ejemplo, se ha demostrado que láminas de grafito pueden presentar respuesta TL ante radiación de fotones y electrones, lo que abre la posibilidad de desarrollar dosímetros pasivos de bajo costo y alta resolución espacial [4,6].

En este trabajo se explora una ruta novedosa utilizando el grafito y modificándolo mediante el dopaje con un material común y de bajo costo: la sal de cocina (NaCl). La hipótesis planteada es que la incorporación de NaCl en la matriz de grafito puede introducir nuevos centros de atrapamiento o modificar los existentes, incrementando así la sensibilidad TL del material y permitiendo su posible uso como dosímetro pasivo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta termoluminiscente del sistema de grafito dopado con NaCl cuando es expuesto a haces de fotones y electrones de uso clínico, como un paso inicial hacia el desarrollo de un dosímetro de bajo costo y alta resolución espacial.

2.2 Objetivos específicos

- Preparar una muestra homogénea de grafito modificado con NaCl mediante molienda, dispersión en solvente, secado y prensado en forma de pastillas.
- Evaluar la respuesta TL del sistema Grafito-NaCl tras ser irradiado con fotones de 6 MV y electrones de 18 MeV a una dosis de 1 Gy.
- Comparar la señal TL obtenida de las muestras irradiadas con una muestra referencia basal no irradiada para identificar la señal basal del material.
- Analizar las curvas de brillo resultantes para determinar la sensibilidad relativa del material a cada tipo de radiación.

3. Metodología

3.1 Materiales

Se emplearon dos tipos de grafito como matriz base: grafito técnico en polvo y grafito de grado analítico. La principal diferencia entre ambos radica en su pureza y en la presencia de impurezas. El grafito técnico, también conocido como grafito industrial o de grado comercial, presenta un contenido de carbono generalmente entre 90 % y 95 %, con impurezas provenientes del proceso de extracción y molienda, y se utiliza comúnmente en aplicaciones industriales donde no se requieren altos estándares de pureza [10]. En contraste, el grafito analítico posee una pureza ≥ 90 % (pudiendo alcanzar hasta 100%) y está diseñado específicamente para su uso en aplicaciones de laboratorio que requieren alta pureza, con concentraciones controladas de contaminantes y características fisicoquímicas más consistentes [9].

Como modificador se utilizó sal de cocina comercial de grano. Para la dispersión de la mezcla se emplearon dos solventes: acetona (CH_3COCH_3) para el grafito técnico e isopropanol (C_3H_8O) para el grafito analítico. Además, se utilizaron mortero y pistilo de ágata, horno de secado, sonicador (zonificador), prensa hidráulica, pastillero negro para almacenamiento y espectrómetro FTIR para la caracterización inicial del material.

3.2 Preparación de las muestras

Para la primera formulación se pesaron 465.1 mg de grafito técnico y 36.6 mg de sal de cocina de grano. Ambos sólidos se colocaron en un tubo de ensayo y se adicionaron 2.5 mL de acetona mediante micropipeta. La mezcla fue sometida a sonicación durante 1 h en un zonificador, con el propósito de favorecer la dispersión de la sal dentro de la matriz de grafito y obtener una mezcla más homogénea.

Posteriormente, la suspensión fue transferida a un vaso de precipitado y colocada en un horno de secado durante 30 min, con el fin de eliminar los residuos de acetona. Una vez seca, la muestra se molió manualmente en mortero durante 1 h para obtener un polvo fino y homogéneo antes del prensado.

La proporción empleada corresponde aproximadamente a:

$$m_{grafito} = 465.1mg \pm 0.1mg$$

$$m_{sal} = 36.6\,mg \pm 0.1mg$$

$$m_{total} = 501.7\,mg \pm 0.1mg$$

$$Porcentaje\ sal = \frac{36.6}{501.7} \times 100 \approx 7.3\%$$

Nota: las incertidumbres corresponden al error de la balanza analítica utilizada (± 0.1 mg).

Para el segundo lote (grafito analítico) se mantuvo la misma proporción de dopante, es decir, aproximadamente 7.3 % en masa de sal de cocina, pero se empleó isopropanol como solvente de dispersión en lugar de acetona. El procedimiento de sonicación, secado, molienda, prensado y tratamiento térmico fue equivalente al empleado para el grafito técnico.

3.3 Obtención de pastillas de grafito técnico–sal de cocina

Del polvo obtenido se tomaron porciones cercanas a 50 mg para la formación de pastillas mediante prensado hidráulico. El registro experimental reporta cinco intentos de prensado para el sistema grafito técnico–sal de cocina. Las masas y observaciones fueron las siguientes: una pastilla se descomprimió al manipularla, tres se conservaron íntegras con masas de 44.9 mg, 47.2 mg y 43.2 mg, y una pastilla de 40.3 mg se partió antes del borrado térmico.

Las pastillas íntegras fueron marcadas y sometidas a un tratamiento térmico preliminar a 100 °C durante 1 h. Posteriormente, se permitió que el horno enfriara hasta temperatura ambiente para poder retirar las pastillas y evitar cambios bruscos de temperatura. Una vez alcanzada la temperatura ambiente, las pastillas fueron almacenadas en un pastillero negro para reducir la exposición a la luz ambiental.

3.4 Preparación del grafito analítico dopado con sal de cocina

Debido a que las pastillas de grafito técnico dopado con sal de cocina no mostraron una respuesta termoluminiscente apreciable bajo las condiciones iniciales de medición, se preparó un segundo lote utilizando grafito analítico, manteniendo la misma proporción de dopante, es decir, aproximadamente 7.3 % en masa de sal de cocina. El procedimiento de dispersión en acetona, sonicación, secado, molienda, prensado y tratamiento térmico fue equivalente al empleado para el grafito técnico.

Para este segundo lote se registraron cinco intentos de pastilla. Las masas reportadas fueron 42.4 mg, 26.3 mg, 44.2 mg y 42.6 mg; dos de las pastillas se reportaron como rotas o no disponibles, mientras que una de ellas presentó una coloración ligeramente más oscura.

Las diferencias en masa, integridad mecánica y apariencia fueron consideradas relevantes para el análisis posterior, ya que pueden modificar la intensidad TL registrada y la reproducibilidad de la respuesta. Por ello, en las etapas posteriores de análisis se recomienda normalizar la señal termoluminiscente respecto a la masa de cada pastilla. A continuación, se presenta un diagrama de la metodología utilizada.

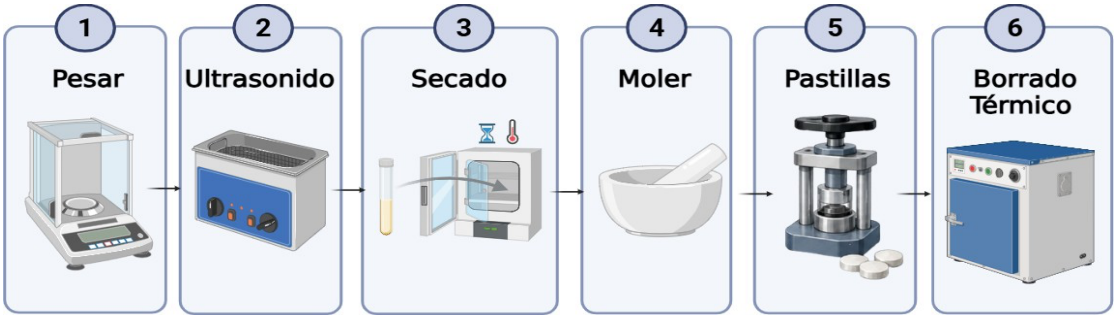


Figura 1.
Flujo general de preparación de pastillas de grafito dopado con sal de cocina: pesado, ultrasonido, secado, molienda, prensado y borrado térmico. Created with BioRender.com

3.5 Irradiación

Las pastillas de grafito dopado con sal de cocina fueron irradiadas con el propósito de evaluar su respuesta termoluminiscente ante dos tipos de radiación ionizante utilizados comúnmente en el ámbito clínico: electrones y fotones. En radioterapia, los fotones de megavoltaje (6 MV) se emplean para el tratamiento de tumores profundos debido a su alta capacidad de penetración, mientras que los electrones de 18 MeV se utilizan para lesiones superficiales, ya que depositan su energía máxima en los primeros centímetros de tejido y presentan un descenso rápido de dosis más allá de su alcance, lo que permite preservar tejido sano subyacente. [8,10] Estas diferencias en la interacción con la materia hacen relevante evaluar la respuesta TL del material ante ambos tipos de radiación.

Primero se irradiaron las pastillas elaboradas con grafito técnico dopado con sal de cocina. Las muestras fueron expuestas tanto a electrones de 18 MeV como a fotones de 6 MV, manteniendo una dosis de 1 Gy para cada condición.

Posteriormente, se irradiaron pastillas de grafito analítico dopado con sal de cocina, manteniendo la misma composición aproximada de dopante. Para este lote se consideraron tres condiciones experimentales: una muestra sin irradiación, utilizada como referencia basal; muestras irradiadas con electrones de 18 MeV a 1 Gy; y muestras irradiadas con fotones de 6 MV a 1 Gy, como se muestra en la **Tabla 1**.

La muestra sin irradiar se incluyó para identificar la contribución basal del material y posibles señales asociadas con su historia previa. Sin embargo, debido a que no se realizó un protocolo completo de borrado térmico antes de todas las lecturas, esta muestra no debe interpretarse como un blanco dosimétrico definitivo, sino como una referencia preliminar de señal residual.

Material	Condición	Energía / calidad del haz	Dosis
Grafito técnico + sal de cocina	Irradiado con electrones	18 MeV	1 Gy
Grafito técnico + sal de cocina	Irradiado con fotones	6 MV	1 Gy
Grafito analítico + sal de cocina	Sin irradiar	—	—
Grafito analítico + sal de cocina	Irradiado con electrones	18 MeV	1 Gy
Grafito analítico + sal de cocina	Irradiado con fotones	6 MV	1 Gy

Tabla 1. Organización experimental de las muestras de grafito técnico y grafito analítico dopadas con sal de cocina, indicando condición de irradiación, energía del haz y dosis absorbida nominal.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

3.6 Mediciones Termoluminiscentes

Las mediciones de termoluminiscencia (TL) se realizaron utilizando un **Harshaw TLD 3500** (Thermo Electron Corporation). Este equipo está diseñado para registrar la emisión luminosa producida por materiales previamente irradiados cuando son sometidos a un calentamiento controlado. La luz emitida durante el proceso es detectada mediante un tubo fotomultiplicador (PMT), lo que permite obtener la **curva de brillo (glow curve)**, que representa la intensidad de la emisión termoluminiscente en función de la temperatura. [3,4,6]

Para cada medición, las muestras se colocaron individualmente en la bandeja de lectura del equipo y fueron sometidas a un programa de calentamiento lineal. Durante el incremento de temperatura, los electrones atrapados en defectos o centros de atrapamiento del material adquieren suficiente energía para liberarse y recombinarse con centros luminiscentes, produciendo la emisión de fotones característica del fenómeno de termoluminiscencia.

Las mediciones se realizaron bajo las siguientes condiciones experimentales:

- **Tasa de calentamiento:** 10 °C/s.
- **Precalentamiento:** 50 °C.
- **Temperatura máxima de lectura:** 400 °C.

Bajo estas condiciones, el equipo registró la intensidad de la emisión termoluminiscente en función de la temperatura, obteniéndose las curvas de brillo correspondientes para cada una de las muestras analizadas. Estas curvas fueron empleadas para evaluar la respuesta termoluminiscente de los materiales y comparar su comportamiento bajo las diferentes condiciones experimentales.

3.7 Procesamiento matemático de las curvas TL

Las curvas termoluminiscentes fueron analizadas como señales discretas de intensidad en función de la temperatura. Para cada muestra se registró una curva cruda $I_{cruda(Ti)}$, donde $T_i$corresponde a la temperatura asociada al canal i del lector TL. Primero se realizó la corrección por ruido instrumental mediante la resta canal por canal:

$$I_{corr(T_i)} = I_{cruda(T_i)} - I_{ruido(T_i)}$$

donde $I_{corr(Ti)}$ es la intensidad corregida, $I_{cruda(Ti)}$ es la señal registrada directamente por el lector y $I_{ruido(Ti)}$ corresponde al fondo instrumental medido bajo el mismo programa de lectura. Debido a que las pastillas presentaron masas diferentes, la señal corregida fue normalizada respecto a la masa de cada muestra:

donde m es la masa de la pastilla en mg [3]. $I_{norm(T_i)} = \frac{I_{corr(T_i)}}{m}$

La emisión TL total se estimó mediante la integral discreta de la curva corregida:

$$A_{TL} = \Sigma I_{corr(T_i)}$$

Como todas las curvas fueron registradas bajo el mismo programa de calentamiento, esta suma discreta se utilizó como una magnitud proporcional al área bajo la curva TL [3,4].

También se calculó la integral normalizada por masa:

$$A_{TL}, norm = \frac{A_{TL}}{m}$$

Dado que las muestras irradiadas recibieron una dosis nominal de 1 Gy, esta cantidad se utilizó como indicador preliminar de sensibilidad relativa. Adicionalmente, se identificó la intensidad máxima de cada curva y la temperatura correspondiente al máximo TL:

$$I_{max} = \max[I_{corr}(T_i)]$$

$$T_M = T(I_{max})$$

4. Resultados y Discusión

4.1 Espectro de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

En el caso del grafito técnico dopado con NaCl, el espectro de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) no mostró bandas adicionales claramente atribuibles a la sal (Figura 2). Este comportamiento es congruente con la baja actividad infrarroja del grafito y con la transparencia del NaCl en gran parte del infrarrojo medio, ya que los compuestos iónicos como el NaCl presentan bandas de absorción características típicamente en la región de 400-500 cm^{-1}, correspondientes a vibraciones de la red cristalina.

Las pequeñas fluctuaciones observadas cerca de 3400 cm^{-1} pueden estar asociadas con humedad residual, trazas de acetona o ruido instrumental; por ello, no se asignan de manera concluyente a una modificación química del material, como se resume en la Tabla 2.

El espectro FTIR no permite confirmar una interacción química directa entre la sal de cocina y la matriz de grafito. La ausencia de bandas claramente atribuibles al dopante sugiere que la incorporación de la sal fue principalmente física, por dispersión dentro de la matriz carbonosa, más que por formación de nuevos enlaces detectables mediante FTIR. Por ello, la evaluación de la respuesta TL resulta más relevante para determinar si la modificación con sal de cocina produjo centros de atrapamiento útiles para la emisión termoluminiscente.

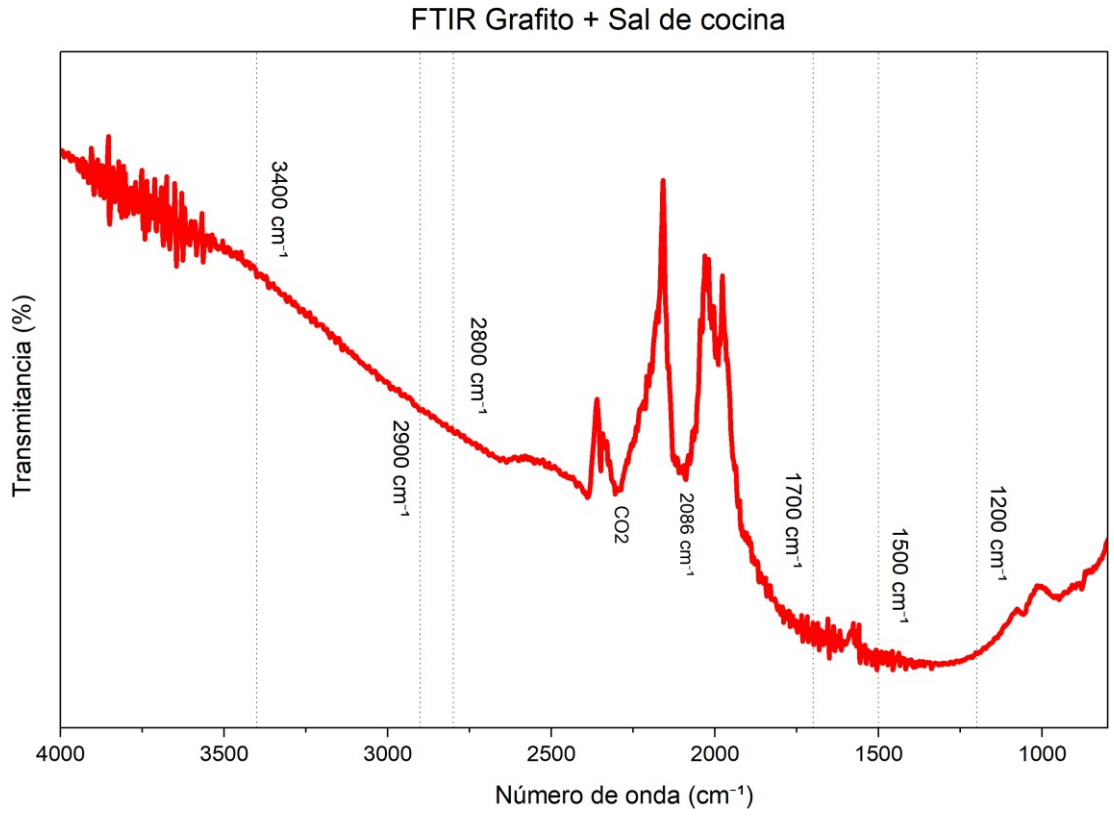


Figura 2. Espectro FTIR del grafito técnico dopado con sal de cocina comercial.

Región aproximada	Posible contribución	Interpretación
~3400 cm^{-1}	Estiramiento O–H	Posible humedad residual o trazas de solvente
2900–2800 cm^{-1}	Vibraciones C–H débiles	Posibles residuos orgánicos o contaminación superficial
2300–2400 cm^{-1}	CO_2 atmosférico	Artefacto instrumental por fondo no compensado
~2088 cm^{-1}	CO_2 / compensación de fondo	Artefacto instrumental
1700–1500 cm^{-1}	Señales débiles de grupos superficiales	Posibles grupos oxigenados o ruido instrumental
<1200 cm^{-1}	Región de baja intensidad	No se identifican bandas concluyentes atribuibles a NaCl

Tabla 2. Interpretación general del espectro FTIR del grafito técnico dopado con sal de cocina.

4.2 Respuesta termoluminiscente (TL)

Para el grafito técnico dopado con NaCl, las lecturas TL iniciales no mostraron una respuesta suficientemente definida, como se puede observar en la Figura 3, donde se presenta la curva TL de una pastilla de grafito técnico dopado con sal de cocina irradiada con electrones de 18 MeV a 1 Gy. La señal registrada es comparable al ruido instrumental, sin evidencia de un máximo termoluminiscente distinguible, lo que limitó su análisis dosimétrico en esta etapa.

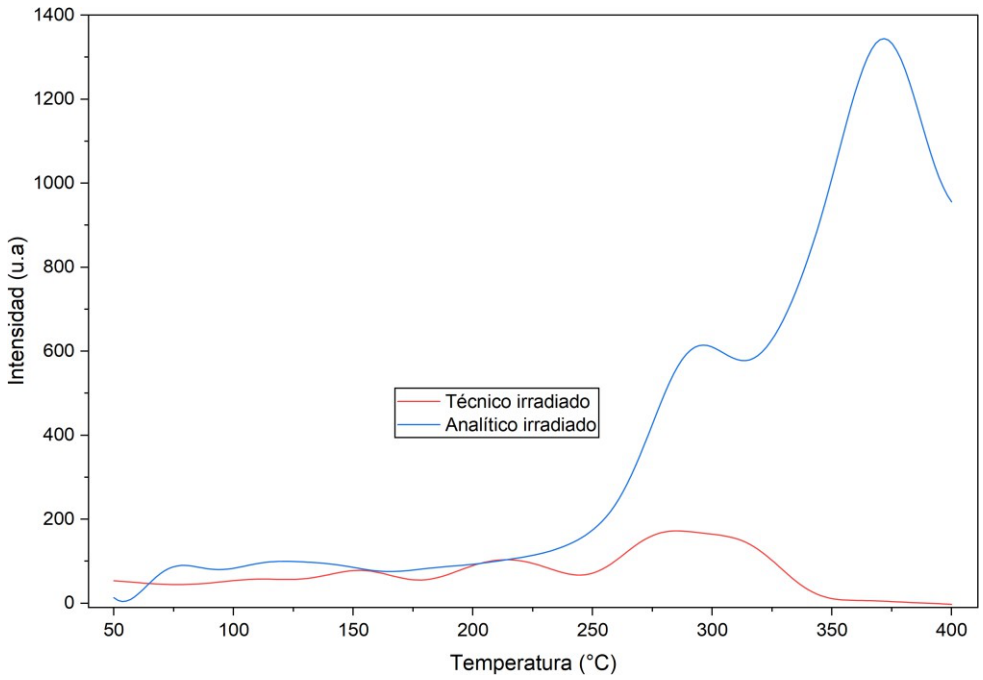


Figura 3. Curva TL del grafito técnico dopado con sal de cocina irradiado con electrones de 18 MeV a 1 Gy, donde se observa la ausencia de una respuesta termoluminiscente definida, siendo comparada con una señal del grafito analítico irradiado con las mismas condiciones.

No obstante, al cambiar la matriz de grafito técnico a grafito analítico, se observó una mejora significativa en la respuesta TL del sistema dopado con NaCl. La Figura 4 compara la muestra sin irradiar con aquellas irradiadas con electrones de 18 MeV y fotones de 6 MV, a una dosis de 1 Gy. La respuesta más intensa correspondió a la irradiación con electrones, mientras que la curva obtenida con fotones mostró una intensidad menor. Sin embargo, es importante destacar que la muestra sin irradiar también presentó una señal considerable, lo que impide una interpretación dosimétrica definitiva sin la realización de experimentos adicionales que incluyan repeticiones, borrado controlado y sustracción de fondo.

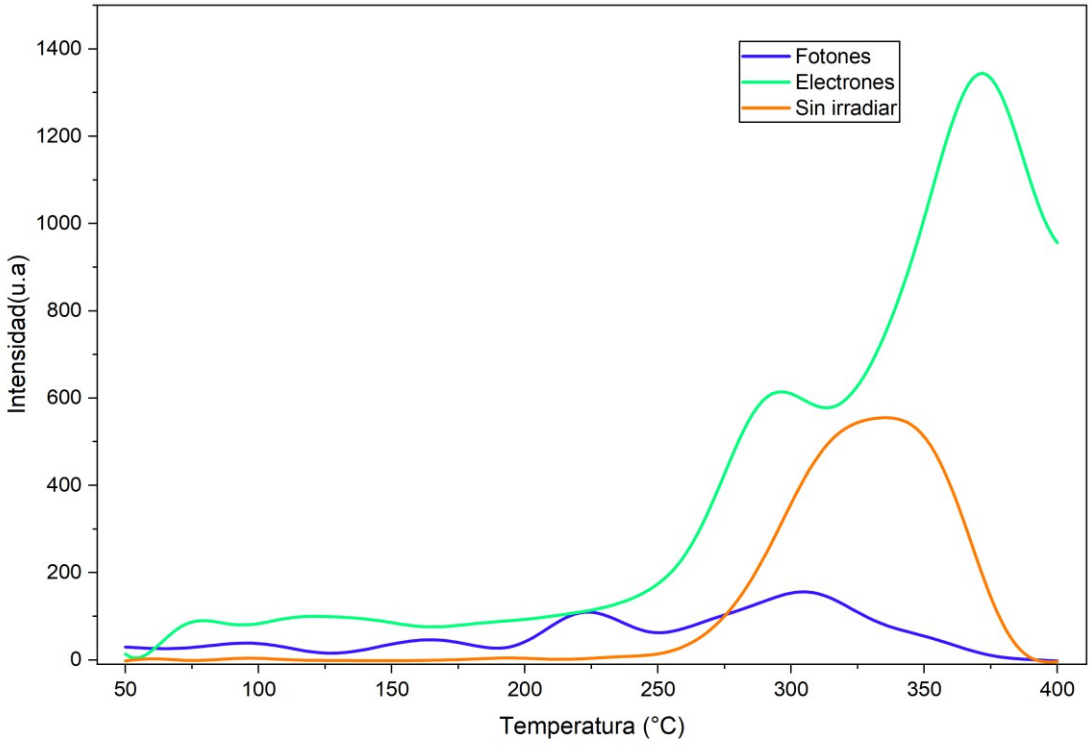


Figura 4. Curvas TL de grafito analítico dopado con sal de cocina: muestra sin irradiar y muestras irradiadas con electrones de 18 MeV y fotones de 6 MV, a una dosis de 1 Gy.

4.2.1 Análisis cuantitativo de las curvas TL

Para comparar cuantitativamente las curvas TL del grafito analítico dopado con sal de cocina, se calcularon las integrales crudas, las integrales corregidas por ruido instrumental y las integrales normalizadas por masa. La muestra sin irradiar se consideró como una referencia basal preliminar, mientras que las muestras irradiadas correspondieron a electrones de 18 MeV y fotones de 6 MV, ambas a una dosis de 1 Gy. Cabe señalar que todas las masas reportadas incluyen el error instrumental de la balanza analítica utilizada (± 0.1 mg), como se indica en las Tablas 3-5.

Muestra	Condición	Masa (mg)	Integral cruda	Integral corregida	Integral corregida/mg
Sin irradiar	Sin irradiar	42.4 ± 0.1	241376	30733	724.8
Electrones	Electrones 18 MeV, 1 Gy	44.2 ± 0.1	286105	75462	1707.3
Fotones	Fotones 6 MV, 1 Gy	42.6 ± 0.1	205245	- 5398	- 126.7

Tabla 3. Parámetros cuantitativos obtenidos a partir de las curvas TL corregidas.

La muestra irradiada con electrones presentó la mayor respuesta TL corregida, con una integral normalizada de 1707.3 cuentas/mg. La muestra sin irradiar presentó una integral corregida de 724.8 cuentas/mg, lo que confirma la presencia de una señal basal considerable. En el caso de la muestra irradiada con fotones, la integral corregida total fue negativa debido a que la sustracción del ruido instrumental superó la señal integrada total de la curva. Por esta razón, también se calculó la contribución positiva de la señal corregida.

Muestra	Condición	Integral positiva	Integral positiva/mg
Sin irradiar	Sin irradiar	40370	952.1
Electrones	Electrones 18 MeV, 1 Gy	76053	1720.7
Fotones	Fotones 6 MV, 1 Gy	11628	273.0

Tabla 4. Integral positiva de las curvas TL corregidas.

Al considerar únicamente la contribución positiva de la señal corregida, la respuesta de la muestra irradiada con electrones fue aproximadamente 1.81 veces mayor que la señal basal de la muestra sin irradiar y 6.30 veces mayor que la respuesta obtenida para fotones. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, el grafito analítico dopado con sal de cocina presentó una respuesta TL más intensa frente a electrones de 18 MeV que frente a fotones de 6 MV.

Muestra	Condición		
Sin irradiar	Sin irradiar	946	356.0
Electrones	Electrones 18 MeV, 1 Gy	2139	375.4
Fotones	Fotones 6 MV, 1 Gy	979	220.6

Tabla 5. Posición e intensidad del máximo TL.

La muestra irradiada con electrones mantuvo la mayor intensidad, con un máximo suavizado de 1468.2 alrededor de 375.4 °C. La muestra sin irradiar presentó un máximo suavizado de 736.6 cerca de 356.0 °C, mientras que la muestra irradiada con fotones presentó una señal menor, con un máximo suavizado de 201.2 alrededor de 301.5 °C.

5. Conclusiones

En este trabajo se evaluó de forma preliminar la respuesta termoluminiscente de pastillas de grafito dopado con sal de cocina comercial, empleada como fuente mayoritaria de NaCl, con una concentración aproximada de 7.3 % en masa. La preparación se realizó inicialmente con grafito técnico y posteriormente con grafito analítico, con el propósito de comparar la influencia del material base sobre la respuesta TL.

En el sistema Grafito 1 dopado con NaCl, los resultados fueron en su mayoría negativos o inconclusos. El análisis FTIR no mostró bandas adicionales claramente atribuibles a la sal, y las pequeñas fluctuaciones observadas cerca de 3400 cm^{-1} se asociaron con humedad residual, trazas de acetona o ruido instrumental. De manera congruente, las lecturas TL iniciales de este sistema no presentaron una respuesta suficientemente definida, por lo que no fue posible establecer una interpretación dosimétrica.

El cambio al Grafito 2, de carácter analítico, representó una mejora en el comportamiento TL del sistema dopado con sal de cocina. En este caso se obtuvieron curvas TL distinguibles para la muestra sin irradiar, la muestra irradiada con electrones de 18 MeV a 1 Gy y la muestra irradiada con fotones de 6 MV a 1 Gy. Después de la corrección por ruido instrumental, la muestra irradiada con electrones presentó la mayor integral corregida, con 75462 cuentas. Al normalizar por masa, esta respuesta correspondió a 1707.3

cuentas/mg, mientras que la muestra sin irradiar presentó 724.8 cuentas/mg. Esto indica que la señal asociada a electrones fue aproximadamente 2.36 veces mayor que la señal basal al considerar la integral corregida total.

Al analizar únicamente la contribución positiva de la señal corregida, la muestra irradiada con electrones presentó una integral positiva normalizada de 1720.7 cuentas/mg, mientras que la muestra sin irradiar alcanzó 952.1 cuentas/mg y la muestra irradiada con fotones 273.0 cuentas/mg. Bajo este criterio, la respuesta a electrones fue aproximadamente 1.81 veces mayor que la señal basal y 6.30 veces mayor que la respuesta obtenida con fotones. La muestra irradiada con electrones también presentó el mayor máximo corregido, con Imax = 2139 cuentas a TM = 375.4 °C. La muestra sin irradiar presentó Imax = 946 cuentas a TM = 356.0 °C, mientras que la muestra irradiada con fotones presentó Imax = 979 cuentas a TM = 220.6 °C.

A pesar de que el Grafito 2 dopado con sal de cocina mostró una respuesta TL distinguible, los resultados no permiten afirmar todavía que el sistema funcione como dosímetro cuantitativo. La muestra sin irradiar presentó una señal basal considerable, lo que indica la presencia de atrapamiento residual, historia previa del material o ausencia de un borrado térmico suficiente. Además, la respuesta de la muestra irradiada con fotones fue débil y altamente dependiente del procedimiento de corrección de fondo.

En conjunto, los resultados preliminares sugieren que el Grafito 2 presenta una respuesta TL más prometedora que el Grafito 1, especialmente bajo irradiación con electrones de 18 MeV. No obstante, se requiere aumentar el número de muestras para generar una base estadística suficiente, evaluar la reproducibilidad de la respuesta y controlar variables como masa, geometría, borrado térmico y fondo instrumental. Por ello, el sistema grafito–sal de cocina debe considerarse todavía como un material en etapa exploratoria, con posible sensibilidad TL ante electrones, pero no como un dosímetro validado.

6. Bibliografía/Referencias

1. Furetta, C., Weng, P.S., 1998. Operational Thermoluminescence Dosimetry. World Scientific.
2. Chen, R., McKeever, S.W.S., 1997. Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena. World Scientific, Singapore.
3. Khandaker, M. U., Lam, S. E., Ariff Bin Md Daud, A. N., Abdul Sani, S. F., Bradley, D. A., Alzimami, K. S., Almohammed, H. I., Hamd, Z. Y., Osman, H. (2024). Thermoluminescence dosimetry and microstructural characteristics of gamma-irradiated natural flake graphite. Radiation Physics and Chemistry, 221, 111794. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111794
4. Mat Nawi, S. N., Khandaker, M. U., Abdul Sani, S. F., Lam, S. E., Ung, N. M., Almugren, K. S., Bradley, D. A. (2022). Low-cost commercial graphite-rich pencils subjected to electron irradiation for passive radiation dosimetry. Applied Radiation and Isotopes, 188, 110419. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110419
5. Bradley, D. A., Lam, S. E., Mat Nawi, S. N., Abdul Sani, S. F., Ung, N. M., Alzimami, K., Khandaker, M. U., Moradi, F., Taheri, A. (2024). Graphite as a skin and epithelium dosimeter at mammographic energies. Radiation Physics and Chemistry, 218, 111543. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111543
6. Bradley, D. A., Lam, S. E., Mat Nawi, S. N., Taheri, A., Abdul Sani, F., Ung, N. M., Alzimami, K., Khandaker, M. U., Moradi, F. (2024). Graphite foils as potential skin and epithelium dosimeters at therapeutic photon energies. Applied Radiation and Isotopes, 210, 111371. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111371
7. Socrates, G. (2001). Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts. 3rd ed. John Wiley & Sons.

Griffiths, P. R., de Haseth, J. A. (2007). Fourier Transform Infrared Spectrometry. 2nd ed. Wiley.