

Pastillas sinterizadas de Al_2O_3 como dosímetros termoluminiscentes

Al_2O_3 sintered pellets as thermoluminescent dosimeters

Pastilhas sinterizadas de Al_2O_3 como dosímetros termoluminescentes

Amalia Osorio¹, Juana Salcedo² y
Rafael Cogollo³

Recepción: 28-mar-2011/Modificación: 23-abr-2012/Aceptación: 30-abr-2012
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

La verificación de la dosis de radiación recibida por el área expuesta durante el tratamiento médico es esencial para la evaluación de cualquier régimen de radioterapia. Este trabajo describe las características termoluminiscentes (TL) de pastillas sinterizadas de Al_2O_3 , para su posible uso como dosímetro TL de baja dosis. Pastillas de Al_2O_3 sinterizadas bajo diferentes condiciones de calcinación, con un diámetro de 5 mm y un espesor de 1 mm, fueron irradiadas a diferentes dosis usando una unidad de ^{60}Co Theratron 780C[®] en aire a temperatura ambiente. La lectura se realizó en un Harshaw TLD 4500. Las principales propiedades dosimétricas del material (curva de brillo, reproducibilidad de la respuesta, reutilización, linealidad y decaimiento térmico) han sido estudiadas en detalle. La curva de brillo de las pastillas sinterizadas de Al_2O_3 presenta un intenso pico TL alrededor de los 165°C, el cual puede ser

¹ Física, amaliaosorio_h@hotmail.com, Departamento de Física y Electrónica, Universidad de Córdoba, Montería Colombia.

² Física, jqintero8720@yahoo.com, Departamento de Física y Electrónica, Universidad de Córdoba, Montería-Colombia.

³ Magíster en Física, racopi2@yahoo.com, Profesor, Departamento de Física y Electrónica, Montería Colombia.

usado para dosimetría. Los resultados muestran que las pastillas pueden ser usadas en programas de control de calidad como dosímetro termoluminiscente en el rango de dosis terapéuticas. La importancia de este trabajo radica en que el óxido de aluminio ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) es una alternativa prometedora dentro de los materiales TL usados para dosimetría “in vivo” dentro de los programas de control de calidad.

Palabras claves: Al_2O_3 , dosimetría, termoluminiscencia.

Abstract

Verification of the radiation doses received by the area exposed during medical treatment is essential for assessing any scheme radiotherapy. This work describes the characteristic thermoluminescent (TL) of sintered Al_2O_3 pellets, for its use as dosimeter dose low. Sintered Al_2O_3 pellets under different calcinations with a diameter of 5 mm and a thickness of 1 mm, they were irradiated to different dose using an unit of ^{60}Co Theratron 780C[®] in air to ambient temperature. The reading was carried in a Harshaw TLD 4500. The main dosimetric properties of the material (glow curve, response reproducibility, reutilization, linearity and fading) have been studied in detail. The glow curve of the thin sintered Al_2O_3 pellets presents an intense peak TL to about 165°C, which can be used for dosimetry. The results show that the pellets can be used in quality control programs as thermoluminescent dosimeter in therapeutic dose range. The importance of this work is that the aluminum oxide ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) is a promising alternative in TL materials used for dosimetry “in vivo” within quality control programs.

Key words: Al_2O_3 , dosimetry, thermoluminescence.

Resumo

A verificação da dose de radiação recebida pela área exposta durante o tratamento médico é essencial para a avaliação de qualquer regime de terapia de radiação. Este trabalho descreve as características de termoluminescência (TL) de Al_2O_3 pastilhas sinterizadas, para possível uso como dosímetro TL de baixa dose. Pastilhas de Al_2O_3 sinterizadas baixo diferentes condições de calcinação, com um diâmetro de 5 mm e uma espessura de 1 mm, foram irradiadas em diferentes doses, utilizando uma unidade de ^{60}Co Theratron 780C[®] em ar à temperatura ambiente. A leitura foi realizada em um Harshaw TLD 4500. As principais propriedades de dosimetria do material (curva de brilho, reprodutibilidade da resposta, reutilização, linearidade e decaimento térmica) têm sido estudadas em detalhe. A curva de brilho das pastilhas sinterizadas de Al_2O_3 apresenta um intenso pico em torno de 165°C, que pode ser usado para dosimetria. Os resultados mostram que as pastilhas podem ser utilizadas em programas de controle de qualidade como um dosímetro termoluminescente na faixa de dose terapéuticas. A importância deste trabalho é que o óxido de alumínio ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) é uma alternativa promissora dentro dos materiais

TL utilizados para dosimetría “em vivo” dentro de programas de controle de qualidade.

Palavras chaves: Al_2O_3 , dosimetría, termoluminescência.

1 Introducción

El proceso de irradiación en los centros donde se trabaja con radiaciones ionizantes, ya sea para radioterapia, esterilización, pasteurización, preservación de comidas y tratamiento de materiales, requiere un programa de control de calidad [1]. La verificación de la dosis absorbida es una parte esencial de tal programa y radica simplemente en la comparación entre las dosis medidas con las dosis prescritas, ya sea en tratamientos médicos o en procesos industriales. Aunque existen diferentes técnicas dosimétricas, la dosimetría termoluminiscente (TLD) es una de las más utilizadas [2] para desarrollar este tipo de estudios; consiste en ubicar en los puntos de mayor interés, materiales que al ser irradiados absorben parte de la energía de la radiación y luego la reemiten al ser sometidos a tratamientos térmicos.

Aunque desde sus inicios el dosímetro termoluminiscente (TL) de mayor uso [3] ha sido el LiF:Mg,Ti (TLD-100), en años recientes han sido propuestos y probados todo tipo de materiales [4, 5, 6, 7, 8] para ser usados con este propósito; entre los que se destaca el óxido de aluminio ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) natural y sintético [9, 10, 11, 12, 13, 14]; el cual, es una alternativa prometedora dentro de los materiales TL actualmente usados para dosimetría “in vivo” dentro de los programas de control de calidad [9]. Las medidas de las dosis in vivo, proporcionan una manera fiable y eficaz de verificar la exactitud global del proceso en los tratamientos de radioterapia; en donde, la dosis absorbida no se puede desviar más de un 5.0% del valor prescrito tal como se establece en los protocolos internacionales. La dosimetría in vivo proporciona realmente la dosis absorbida por los pacientes en las sesiones de tratamiento lo que ayuda a descubrir y limitar los errores en los procedimientos terapéuticos [15, 16]. Los dosímetros TL son muy convenientes para este uso, particularmente en los procedimientos de radioterapia [17, 18, 19].

Según algunos autores [12] la curva de brillo TL del $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ puro presenta cuatro picos entre 50°C y 350°C , pero sus posiciones, sensibilidades y formas dependen de las concentraciones de las impurezas, las condiciones

de crecimiento de cristal y el tratamiento térmico de los cristales crecidos [12, 13, 14].

En este trabajo, las principales propiedades dosimétricas de pastillas sinterizadas de alúmina irradiadas con rayos Gamma, han sido estudiadas para su uso como dosímetros TL en rangos de dosis terapéuticos.

2 Materiales y Métodos

Polvo de alúmina bohemita (99,995 % de pureza) fabricado por W. R. Grace & Co-Conn fue utilizado para preparar pastillas puras sinterizadas de Al_2O_3 de 5 mm de diámetro y 1 mm de espesor. Las pastillas fueron inicialmente compactadas a dos toneladas de presión y posteriormente sinterizadas a 1000°C en aire en un horno Terrigeno D8[®], a una tasa de $1^\circ\text{C}/\text{minuto}$. Se fabricaron dos grupos de pastillas, el primer grupo (denominado NALO) se sinterizó durante 1 hora, seguidamente las pastillas fueron molidas y nuevamente compactadas para ser sinterizadas a 1000°C durante 1 hora, luego se volvieron a sinterizar a 1000°C durante otra hora. El segundo grupo (denominado ALO) se sinterizó a la misma temperatura durante 3 horas, posteriormente las muestras fueron molidas y compactadas para ser sinterizadas nuevamente a 1000°C durante 3 horas.

Las irradiaciones fueron realizadas en aire a temperatura ambiente en el Centro Cancerológico de la Sabana, usando una unidad de ^{60}Co Theratron 780C[®] a una distancia de 80 cm de la fuente, dentro de un campo de radiación de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ en el plano de irradiación. Las muestras fueron colocadas entre dos placas de acrílico de 5 mm de espesor, con el propósito de alcanzar condiciones de equilibrio electrónico.

La lectura fue realizada en un TLD 4500 fabricado por Bicron[®], usando para ello la plancheta de calentamiento del equipo. Durante el proceso se usó una temperatura de precalentamiento de 50°C , a partir de la cual se realizó la adquisición de datos, a una tasa de $5^\circ\text{C}/\text{s}$ hasta alcanzar una temperatura máxima de 360°C , seguido de un calentamiento a 250°C . Para eliminar la contribución infrarroja debido al calentamiento y reducir los efectos de la humedad durante el proceso, todas las lecturas se realizaron en un flujo de N_2 de alta pureza. Todas las curvas de termoluminiscencia fueron capturadas con el programa comercial WinREMS[®].

Después de cada irradiación las muestras fueron calentadas a 400°C du-

rante 1 hora, en un horno Lindberg/Blue UP150[®], seguido de una fase de enfriamiento en aire hasta temperatura ambiente. Este tratamiento fue sugerido por Rocha, Oliveira y Caldas [9] para reducir la señal de fondo del material después de cada irradiación permitiendo su reutilización y ha sido comúnmente usado para dosímetros comerciales como el TLD - 100 [3].

El análisis estructural se realizó por medio de difracción de rayos X (DRX). Los espectros se obtuvieron, a temperatura ambiente, en un difractómetro X'Pert PRO de PANalytical, usando como radiación incidente la línea $K_{\alpha 1}$ del cobre ($\lambda = 1,54056\text{\AA}$) operando con un voltaje en el tubo de 45 kV y una corriente de 40 mA, variando el ángulo de barrido entre $20^\circ < 2\theta < 90^\circ$ en pasos de 0.026 grados/s. La identificación de las fases presentes se obtuvo mediante el software comercial X'Pert HighScore versión 2.1.

3 Resultados y Análisis

3.1 Análisis estructural

La figura 1 muestra el patrón de difracción para una pastilla sinterizada de Al_2O_3 perteneciente al grupo ALO, en el que se observan principalmente un conjunto de picos o señales correspondientes a la fase de la matriz de alúmina denominada $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (JCPDS 01-080-0786), la cual posee una estructura romboédrica.

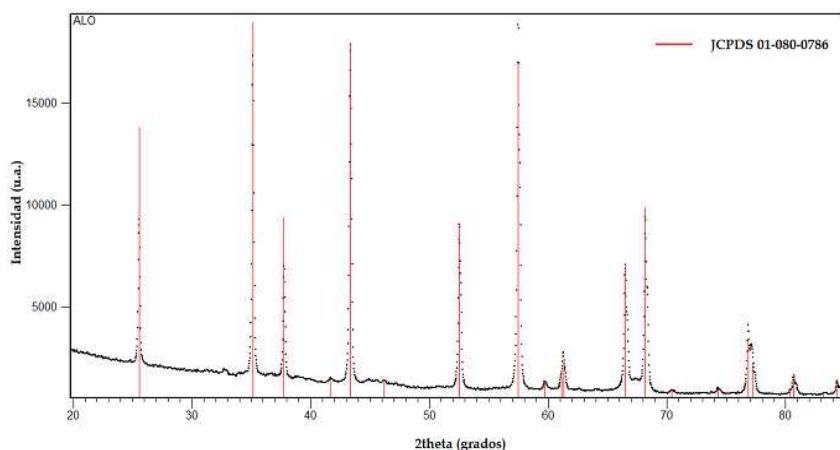


Figura 1: Difractograma de Rayos X para una pastilla de alúmina perteneciente al grupo ALO.

En la figura 2 se muestra el patrón de difracción para una pastilla sinterizada de Al_2O_3 perteneciente al grupo NALO. El análisis del espectro de rayos x mostró la presencia de dos fases, identificándose principalmente la fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (JCPDS 01-080-0786). El conjunto de señales que aún permanecen en el difractograma podrían pertenecer a la fase comúnmente denominada $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ la cual cristaliza entre los 500°C y 900°C . Aunque el ancho de estas señales podría estar relacionado con la presencia de fases amorfas, las cuales pueden introducir defectos durante el proceso de crecimiento del cristal.

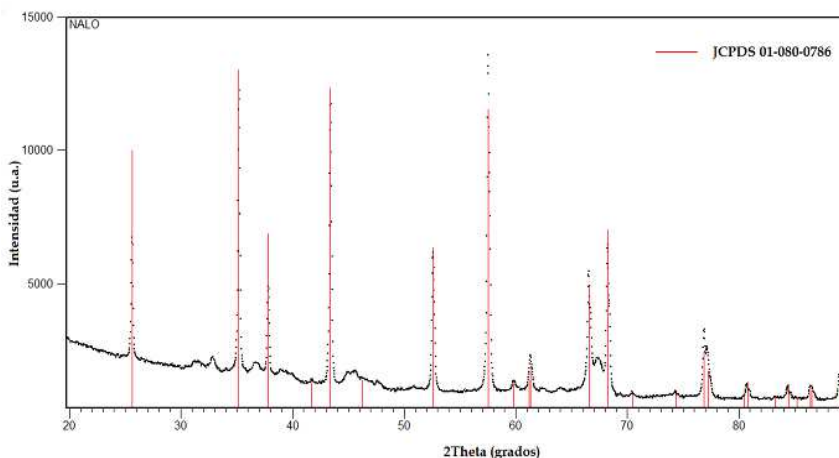


Figura 2: Difractograma de Rayos X para una pastilla de alúmina perteneciente al grupo NALO.

En un sólido cristalino perfecto, los átomos ocupan posiciones ordenadas en una estructura reticular periódica; por lo que la existencia de cualquier alteración en esta estructura constituye un defecto. En la naturaleza no existen cristales perfectos, sino que contienen un cierto número de defectos de átomos de impurezas que perturban el diagrama de energía. Los defectos o imperfecciones pueden estar constituidos por vacancias, iones intersticiales, dislocaciones, fases amorfas, etc. Estas imperfecciones pueden ser creadas durante el crecimiento del cristal (defectos de estructura, dislocaciones) o por medio de irradiación con radiación ionizante [20, 21]. La existencia de defectos en la red cristalina de un sólido (aislante) es importante para que se produzca el fenómeno de luminiscencia cuando el cristal es expuesto a un agente excitante tal como las radiaciones ionizantes. El hecho de que los defectos perturben el diagrama de energía del cristal, hace que se creen localmente

niveles de energía metaestables “permitidos” en la banda prohibida denominados “trampas” tal como se explica más adelante.

3.2 Curva de brillo del Al_2O_3

El proceso TL se inicia con la lectura del material, el cual es estimulado térmicamente, liberando los portadores de carga de las trampas para posteriormente recombinarse radiativamente en algún centro de recombinación, emitiendo fotones. El lector TLD mide la intensidad de luz emitida como función de la temperatura de calentamiento de la muestra TL, proporcionando una curva llamada comúnmente “curva de brillo”(glow curve). Si el cristal contiene más de un tipo de trampas (que es lo más común), este proceso se repite para cada grupo de trampas, dando lugar a varios puntos de máxima intensidad de emisión luminosa en la curva TL, los cuales se conocen comúnmente como picos TL [20, 21, 22, 23].

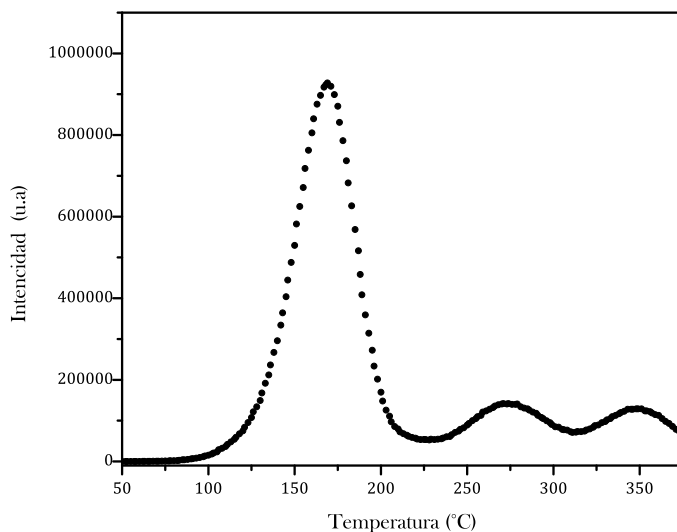


Figura 3: Curva de brillo de pastillas sinterizadas de alúmina irradiadas con una dosis de 10 Gy.

En la figura 3 se observa la curva de brillo de una pastilla sinterizada de alúmina, perteneciente al grupo ALO, irradiada a una dosis de 10 Gy, leída

entre los 50°C y los 380°C a una tasa de calentamiento de $5^\circ\text{C}/\text{s}$. En este rango de temperatura, la curva mostrada exhibe tres picos localizados alrededor de 169°C , 274°C y 345°C respectivamente, en donde el primer pico presenta una gran intensidad comparado con los otros dos, lo que nos indica que existe un mayor número de portadores de carga atrapados en este tipo de trampas. El grupo NALO presentó una curva de brillo similar pero con un ligero corrimiento en la posición del pico principal como se observa en la Figura 4. Otros autores [12] han reportado que la curva de brillo TL del $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ puro presenta cuatro picos entre los 50°C y los 360°C , con la diferencia de que los picos de menor intensidad (menos trampas ocupadas) aparecen a menor temperatura. Sin embargo, recientemente Rocha, Oliveira y Caldas [9] reportaron la presencia del pico principal en el mismo rango de temperaturas que nuestras muestras para pastillas puras sinterizadas de Al_2O_3 .

En la figura 4 se observa la curva de brillo de pastillas sinterizadas de Al_2O_3 , irradiadas a una dosis de 0.5 Gy , leídas entre los 50°C y los 250°C a una tasa de calentamiento de $5^\circ\text{C}/\text{s}$. En este rango, el cual será empleado para la caracterización dosimétrica, la curva exhibe un único pico alrededor de los $165\pm 3^\circ\text{C}$ para el grupo de pastillas NALO y los $170\pm 3^\circ\text{C}$ para el grupo de pastillas ALO. Este pico puede ser usado para dosimetría TL, tal como ha sido reportado en la literatura [9, 24].

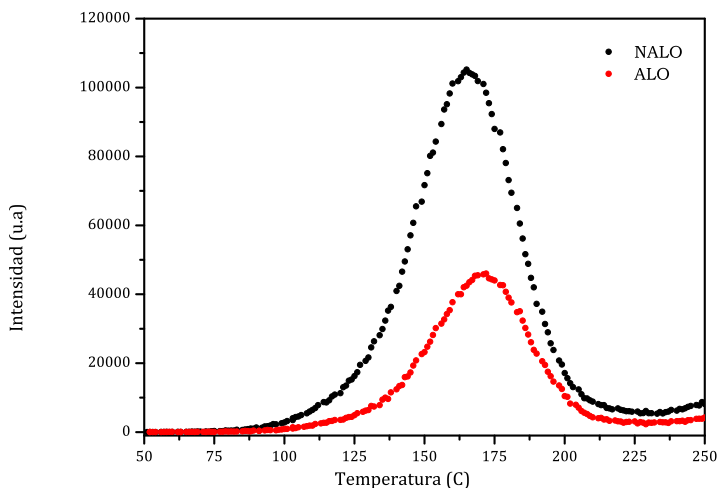


Figura 4: Curva de brillo de pastillas sinterizadas de alúmina irradiadas con una dosis de 0.5 Gy .

De la figura 4 cabe resaltar la diferencia entre las intensidades que se observa para cada grupo de muestras, lo cual está relacionado con el número de portadores de carga atrapados y por supuesto con el número de defectos en el material. Como ya se mencionó, en los materiales termoluminiscentes las emisiones TL son esencialmente procesos relacionados con la presencia de impurezas (dopantes) que han sido introducidas natural o artificialmente en la red de la matriz anfitriona [20, 21, 22, 23] y/o defectos. Estas impurezas o defectos durante el proceso de cristalización del material generan niveles de energía específicos o trampas en la banda de energías prohibidas situada entre la banda de valencia y la banda de conducción que no existen en el material puro. Estos nuevos niveles pueden ser ocupados por los portadores de carga, electrones y/o huecos, liberados durante la irradiación.

La menor intensidad de la señal (Figura 4) exhibida por el grupo ALO, para todas las muestras, incluso a dosis superiores, está relacionada con una menor concentración de defectos o trampas (N) en el material, lo que conlleva una menor concentración de electrones (n) en trampas y huecos (p) en centros de recombinación. Esta respuesta, está en concordancia con los resultados obtenidos en el análisis estructural en donde se encontró que el grupo NALO puede tener distintas fases cristalográficas o incluso la presencia de fases amorfas lo cual incrementa la presencia de defectos en el material. De este resultado puede inferirse que el grupo denominado ALO presenta una mayor cristalización.

En la figura 5 se muestran las curvas de brillo para una pastilla del grupo NALO irradiada a diferentes dosis y leída en un rango de temperatura entre los 50°C y los 250°C; en ella se observa que la intensidad de la señal aumenta proporcionalmente con la dosis, al tiempo que se produce un corrimiento en la posición del pico TL de aproximadamente treinta grados en el rango de dosis empleado. Este crecimiento en la intensidad de la respuesta es evidente, debido a que a medida que aumenta la dosis, el material absorbe más energía y un mayor número de electrones pueden quedar atrapados en las trampas intrínsecas del material. Por tanto, cuanto más electrones se recombinen, más fotones van a emitir, aumentando así la intensidad.

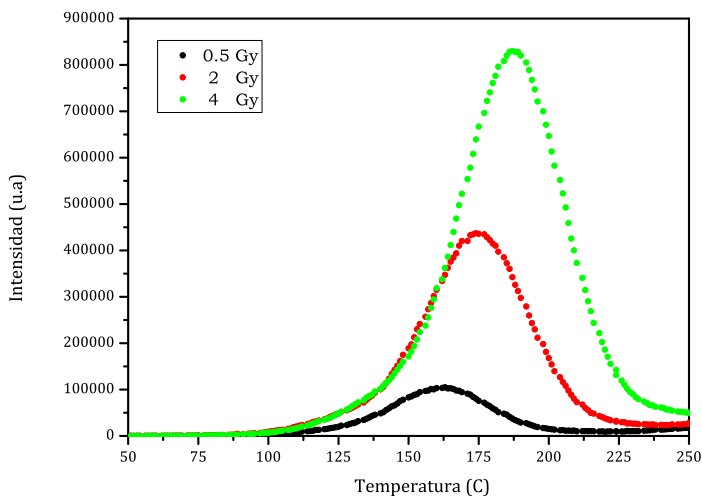


Figura 5: Curva de brillo exhibida por una pastilla irradiada a diferentes dosis perteneciente al grupo NALO.

En la figura 6 se muestran las curvas de brillo para una pastilla perteneciente al grupo ALO irradiada a diferentes dosis y leída en un rango de temperatura entre los 50°C y los 250°C ; en ella es claro que la intensidad de la señal aumenta a medida que aumenta la dosis, mientras que el valor de la intensidad máxima del pico permanece casi inalterado alrededor de los $164 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Esta diferencia en el comportamiento de ambos grupos frente al incremento de la dosis, muestra que el tratamiento térmico modifica no solo el número de trampas sino su tipo, ya que dicho corrimiento puede estar asociado a trampas de mayor profundidad, las que se van alcanzando a medida que se aumenta la dosis de radiación, por lo que se hace necesario mayor energía (temperatura) para liberar los portadores de carga allí atrapados. Sin embargo, debemos tener presente que los defectos o imperfecciones que dan origen a las trampas pueden ser creadas durante el crecimiento del cristal o por medio de irradiación con radiación ionizante [21].

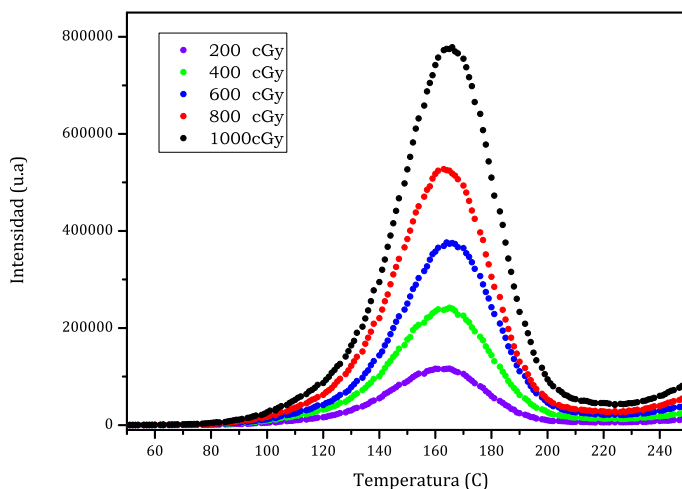


Figura 6: Curva de brillo exhibida por una pastilla irradiada a diferentes dosis perteneciente al grupo ALO.

3.3 Estudio de las propiedades dosimétricas

Para la realización de este análisis todas las muestras recibieron el tratamiento térmico descrito anteriormente ($400^{\circ}\text{C}/1$ hora). Posteriormente se les expuso a diferentes dosis de radiación con el objeto de estudiar sus principales características dosimétricas, a saber: reproducibilidad, respuesta con la dosis (linealidad) y decaimiento térmico. Para la determinación de la intensidad en cada medida el programa realizó la integración del área bajo la curva de los espectros obtenidos, los cuales son similares a los que se observan en las figuras 5 y 6. Todas las lecturas se realizaron entre los 50°C y los 250°C , a una tasa de calentamiento de $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$, durante un intervalo de tiempo de 46,66 s.

Reproducibilidad

La reproducibilidad de un dosímetro TL significa, idealmente, que debe obtenerse siempre la misma lectura al irradiar un mismo dosímetro a la misma dosis un determinado número de veces, borrándolo térmicamente en cada

ocasión. Un material TL óptimo para dosimetría debe tener una reproducibilidad no mayor de 4% después de repetir hasta diez o doce ciclos continuos de tratamiento de borrado térmico, irradiación y lectura de los mismos dosímetros [21]. Para estudiar la reproducibilidad de la respuesta TL las muestras fueron sometidas en repetidas ocasiones al mismo tratamiento térmico definido para su reutilización e irradiadas a una dosis de 50 cGy.

Los puntos de la figura 7 son los valores medios de cada grupo de muestras, obtenidos después de cada lectura. Se han representado los valores medios de cada grupo de medidas normalizados con respecto al valor medio de todas las medidas, flanqueados por dos líneas que delimitan una franja de anchura de $\pm 10\%$ alrededor de este valor. Las barras de error que se presentan en la figura corresponden a una desviación típica de los valores normalizados de cada grupo de medidas.

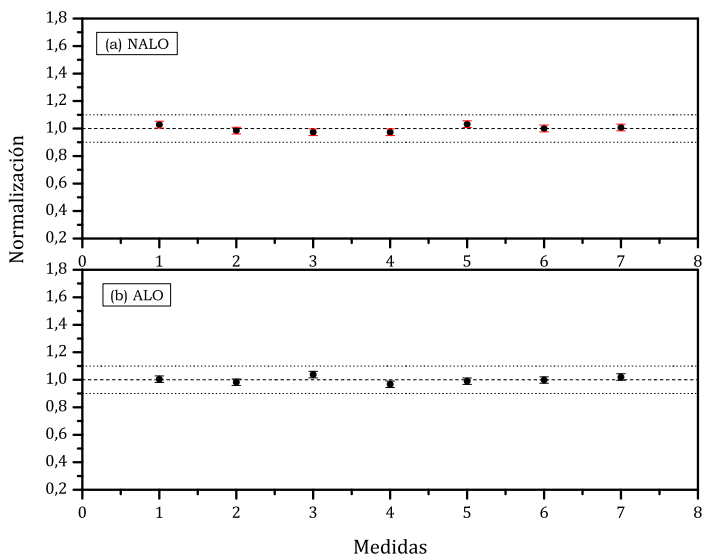


Figura 7: Reproducibilidad de la respuesta para (a) el grupo NALO y (b) para el grupo ALO.

De la gráfica puede observarse que los resultados para cada grupo de pastillas presenta aproximadamente la misma dispersión. Para la parte (a) se encuentra que la incertidumbre asociada con respecto al valor medio de las mediciones tiene un valor del 2.4%, mientras que las barras de error de estas medidas presentaron una incertidumbre del 2.9%.

En la parte (b) la incertidumbre en las medidas con respecto al valor medio es de un 2.3%, en este caso las barras de error de dichas medidas se comportan con una incertidumbre de 4.7%. Otros autores [9] han encontrado una incertidumbre con respecto al valor medio en sus medidas alrededor del 3% para muestras de alúmina irradiadas con rayos gamma.

Respuesta con la dosis

Las pastillas de alúmina de cada grupo de muestras, tratadas térmicamente a 400°C/1h, fueron irradiadas a diferentes dosis desde 0.5 hasta 8 Gy para estudiar la respuesta del material con la dosis. Los resultados se observan en la figura 8, en la cual, los puntos representan los valores medios de cada grupo de medidas, obtenidos después de cada irradiación. Las barras de error corresponden a una desviación estándar sobre los valores de cada grupo de medidas.

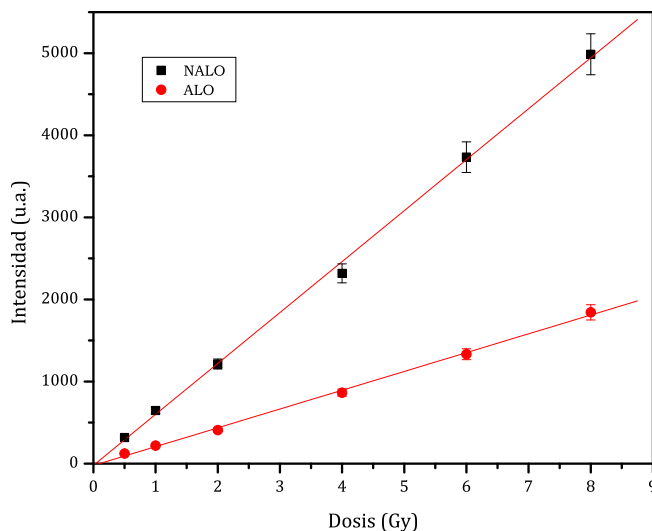


Figura 8: Respuesta lineal del material con la dosis desde 0.5 Gy hasta 8 Gy.

Los resultados muestran un comportamiento lineal en el rango de dosis empleado para cada grupo de pastillas. Resultado similar ha sido reportado por Rocha, Oliveira y Caldas [9].

En su trabajo ellos encontraron un comportamiento lineal desde 0.1 hasta 20 Gy, sin que se presentara saturación en la respuesta.

Decaimiento térmico

Para determinar el debilitamiento térmico de la respuesta TL, cada grupo de pastillas de Al_2O_3 irradiadas a una dosis de 50 cGy, fue almacenado en condiciones ambientales (humedad relativa $\sim 70\%$ y temperatura ambiente de 32 ± 4 °C). La lectura se realizó durante los 30 días siguientes a la irradiación, a espacios de tiempo regulares.

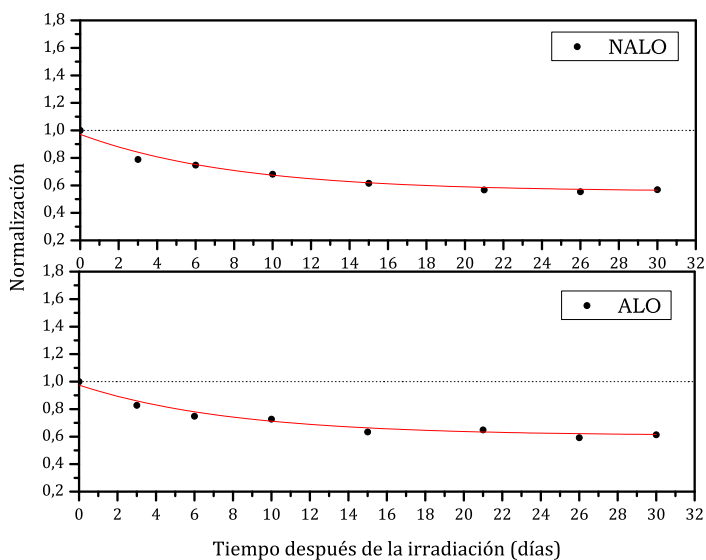


Figura 9: Respuesta lineal del material con la dosis desde 0.5 Gy hasta 8 Gy.

Los puntos de la figura 9 son los valores medios de cada grupo, obtenidos después de cada lectura. Se han representado los valores medios de cada grupo de medidas normalizados con respecto al valor de la primera lectura.

Tres (3) días después de ser irradiadas, las pastillas del grupo NALO, presentaron un decaimiento en la señal del 21 %, mientras que para el grupo ALO, el decaimiento fue del 18 %. Durante los siguientes seis (6) días, el decaimiento de la señal fue de aproximadamente 25 % para ambos grupos.

Después de 10 días, las muestras correspondientes al grupo NALO presentaron un decaimiento en la señal del 32 %, mientras que las pertenecientes al grupo ALO tuvieron una reducción en la señal del 28 %. Este desvanecimiento en la señal alcanza valores alrededor del 40 % después de un mes de irradiadas las muestras, en ambos casos. El fuerte debilitamiento térmico presentado por las muestras puede estar relacionado con las condiciones de almacenamiento (humedad relativa $\sim 70\%$ y temperatura promedio $32\pm 4^\circ\text{C}$), ya que resultados similares [25] se observaron en dosímetros comerciales TLD-100, para los cuales, el desvanecimiento en la respuesta TL varía, según la literatura, del 5 al 10 % anual [26].

Límite de detección

La mínima dosis detectada por las pastillas de alúmina fue de 2 cGy, después que las muestras fueron sometidas a radiación gamma. En todos los casos las muestras exhibieron una curva de brillo similar a la que se observó para altas dosis. Las medidas en este rango presentaron una incertidumbre del 4.5 % para el grupo denominado NALO y del 4.9 % para el grupo denominado ALO. Cabe anotar que 2 cGy es la mínima dosis suministrada por el equipo de radiación.

4 Conclusiones

El estudio de la reproducibilidad de las pastillas de alúmina mostró una incertidumbre asociada con respecto al valor medio de las mediciones menor al 3 % en ambos grupos de muestras; acompañada de una respuesta lineal en el rango de dosis empleado (0.5–8 Gy). Sin embargo, su mayor debilidad es sin duda el debilitamiento de la señal el cual alcanzó valores alrededor del 40 % después de treinta (30) días de ser irradiadas las muestras, en ambos casos. Tal disminución de la respuesta puede estar relacionada con las condiciones de almacenamiento (alta temperatura ambiente y alta humedad relativa) durante el proceso de medición ya que dosímetros comerciales (TLD- 100) exhibieron un decaimiento mayor al reportado en la literatura.

Finalmente podemos afirmar, que el cambio en las condiciones de sinterización de las pastillas de Alúmina, modificó la respuesta TL del material en lo referente a la posición del pico principal y a la intensidad de la señal, lo que

nos indica que el tratamiento térmico modifica no solo el número de trampas sino su tipo. Mientras que las características dosimétricas (reproducibilidad de las medidas, respuesta con la dosis, decaimiento térmico y límite de detección) no sufrieron mayor variación. Como la incertidumbre de las medidas arrojó valores aceptables y el decaimiento de la señal puede ser minimizado usando tratamientos térmicos post-irradiación adecuados [20], los resultados nos permiten concluir que las pastillas sinterizadas de alúmina pueden ser usadas como dosímetros TL en rango de dosis terapéuticas. Hacia el futuro se puede tratar de mejorar las características dosimétricas del material con la inclusión de dopados no reportados en la literatura.

Referencias

- [1] WL. McLaughlin, AW. Boyd, KH. Chadwick, JC. McDonal, A. Miller. *Dosimetry for Radiation Processing*, ISBN 0850667402. Taylor & Francis, Londres, 1989. Referenciado en 49
- [2] F. Daniels, C. Boyd, D. Saunders. *Thermoluminescence as a Research Tool*. Science, ISSN 0036-8075, **117**, 343-349 (1953). Referenciado en 49
- [3] JR. Cameron, D. Zimmermann, G. Keney, R. Buch, R. Bland, R. Grant. *Thermoluminescent radiation dosimetry utilizing LiF*. Health Phys., ISSN 0017-9078, **10**(1), 25-29 (1964). Referenciado en 49, 51
- [4] SG. Vaijapurkar, R. Raman, PK. Bhatnagar. *Sand-a high gamma dose thermoluminescence dosimeter*. Radiation Measurements, ISSN 1350-4487, **29**(2), 223-226 (1998). Referenciado en 49
- [5] S. Chawla, TK. Gundu Rao, AK. Singhvi. *Quartz thermoluminescence dose and dose rate effects and their implications*. Radiation Measurements, ISSN 1350-4487, **29**(1), 53-63 (1998). Referenciado en 49
- [6] LVE. Caldas, MI. Teixeira. *Commercial glass for high doses using different dosimetric techniques*. Radiation Protection Dosimetry, ISSN 0144-8420, **101**(1), 149-152 (2002). Referenciado en 49
- [7] N. Dogan, AB. Tugrul. *Dosimetric evaluation of gamma doses using irradiated lead-alkali-silicate glass*. Radiation Measurements, ISSN 1350-4487, **33**(2), 211-216 (2002). Referenciado en 49
- [8] Pradeep Narayan, KR. Senwar, SG. Vaijapurkar, D. Kumar, PK. Bhatnagar. *Application of commercial glasses for high dose measurement using the thermoluminescent technique*. Applied Radiation and Isotopes, ISSN 0969-8043, **66**(1), 86-89 (2008). Referenciado en 49

- [9] FDG. Rocha, ML. Oliveira, LVE. Caldas. *Thin sintered Al_2O_3 pellets as thermoluminescent dosimeters for the therapeutic dose range*. Applied Radiation and Isotopes, ISSN 0969–8043, **58**(6), 719–722 (2003). Referenciado en 49, 51, 54, 59
- [10] FDG. Rocha, E. Okuno, LVE. Caldas, JC. Bressian, MOO. Silva. *Al_2O_3 sintered pellets for dosimetry at radiotherapy level*. Proceedings of the International Congress of IRPA No. **1** pp 351–353. Hiroshima, (Mayo 2000). Referenciado en 49
- [11] FDG. Rocha, LVE. Caldas. *Characterization of Al_2O_3 sintered pellets for dosimetric applications in radiotherapy*. Journal of Radiological Protection, ISSN 0952–4746, **19**(1), 51–55 (1999). Referenciado en 49
- [12] E. Papin, P. Grosseau, B. Guilhot, M. Benabdesselam, P. Iacconi, D. Lapraz. *Influence of the calcination conditions on the thermoluminescence of pure and doped alumina powders*. Radiation Protection Dosimetry, ISSN 0144–8420, **65**(1), 243–246 (1996). Referenciado en 49, 50, 54
- [13] G. Molnár, M. Benabdesselam, J. Borossay, D. Lapraz, P. Iacconi, M. Akserold. *Influence of the irradiation temperature on TL sensitivity of $Al_2O_3:C$* . Radiation Measurements, ISSN 1350–4487, **33**(5), 619–623 (2001). Referenciado en 49, 50
- [14] V. Kortov, I. Milman. *Some new data on thermoluminescent properties of dosimetric $\alpha-Al_2O_3$ crystals*. Radiation Protection Dosimetry, ISSN 0144–8420, **65**(1–4), 179–184 (1996). Referenciado en 49, 50
- [15] MA. Duch, M. Ginjaume, H. Chakkor, X. Ortega, N. Jornet, M. Ribas. *Thermoluminescent dosimetry applied to in vivo dose measurements for total body irradiations techniques*. Radiotherapy & Oncology, ISSN 0167–8140, **47**, 319–324 (1998). Referenciado en 49
- [16] A. Bartolotta, M. Brai, V. Caputo, R. Diliberto, D. Dimariano, G. Ferrara, P. Puccio, AS. Santamaria. *The response behaviour of $LiF:Mg,Cu,P$ thermoluminescent dosimeters to high energy electron beams used in radiotherapy*. Physics in Medicine and Biology, ISSN 0031–9155, **40**, 211–220 (1995). Referenciado en 49
- [17] AD. Belmonte, JMD. Baraja, ML. Manso, JRS. del Rio. *Exit dose as a method to verify external radiotherapy treatments in vivo by TLD'S*. Physica Medica, ISSN 1120–1797, **17**, 7–9 (2001). Referenciado en 49
- [18] M. Essers, BJ. Mijnheer. *In vivo dosimetry during external photon beam radiotherapy*. International Journal of Radiation Oncology-Biology-Physics, ISSN 0360–3016, **43**, 245–259 (1999). Referenciado en 49
- [19] DC. Weber, P. Nouet, JM. Kurtz, AS. Allal. *Assessment of target dose delivery in anal cancer using in vivo thermoluminescent dosimetry*. Radiotherapy & Oncology, ISSN 0167–8140, **59**, 39–43 (2001). Referenciado en 49

- [20] J.L. Muñiz Gutiérrez. *Métodos experimentales de do-simetría postal para el control de calidad en radioterapia basados en LiF: Mg, Ti (TLD-100) y LiF: Mg, Cu, P (GR-200): Aplicación de métodos numéricos al análisis de las curvas de termoluminiscencia*. Madrid, 1999, 203 h. Tesis Doctoral (Doctor en Ciencias Física). Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Departamento de Física de Materiales. Referenciado en 52, 53, 55, 62
- [21] J. Azorín Nieto. *Estudio de las propiedades termoluminiscentes y ópticas de los principales materiales dosimétricos*. México, D.F. 1993, p 200h. Tesis Doctoral (Doctor en Ciencias Física). Universidad Autónoma Metropolitana - Izatopalapa. Referenciado en 52, 53, 55, 56, 58
- [22] A.J.J. Boss. *High sensitivity thermoluminescence dosimetry*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, ISSN 0168-583X, **184**(1-2), 3-28 (2001). Referenciado en 53, 55
- [23] A.J.J. Boss. *Theory of thermoluminescence*. Radiation Measurements, ISSN 1350-4487, **41**, S45-S56 (2007). Referenciado en 53, 55
- [24] M. Springis, P. Kulis, A. Veispals, V. Tale, I. Tale. *Origin of the 430 K TL peak in thermochemically reduced $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$* . Radiation Protection Dosimetry, ISSN 0144-8420, **65**(1), 231-234 (1996). Referenciado en 54
- [25] J.I. Herrera Cuitiva. *Estudio de las principales características dosimétricas del TLD - 100*. Montería, 2008, 90 h. Trabajo de grado (Físico). Universidad de Córdoba. Facultad de Ciencias e Ingenierías. Departamento de Física y Electrónica. Referenciado en 61
- [26] V. Kortov. *Materials for thermoluminescent dosimetry: Current status and future trends*. Radiation Measurements, ISSN 1350-4487, **42**, 576-581 (2007). Referenciado en 61