

# ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DOSIMÉTRICAS DE TOPACIOS SINTÉTICOS

*Salvador Julián Marcazzó*

Instituto de Física Arroyo Seco (UNCPBA) y CIFICEN (UNCPBA – CICPBA – CONICET), Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina  
(Email: jmarcass@exa.unicen.edu.ar)

## Resumen

Cuando un material dieléctrico o semiconductor es irradiado, las cargas excitadas por la radiación ionizante pueden relajar a través de transiciones radiativas emitiendo luz (*radioluminiscencia*, RL) o pueden quedar atrapadas en centros metaestables o trampas por tiempos muy largos. Una vez finalizada la irradiación, la relajación radiativa de estas cargas atrapadas puede estimularse aumentando la temperatura del material (*termoluminiscencia*, TL) o estimulándolo ópticamente (*luminiscencia estimulada ópticamente*, OSL). Como en general la intensidad de la luz emitida durante la irradiación es proporcional a la tasa de dosis y la emitida durante los procesos de TL u OSL es proporcional a la dosis absorbida, estos fenómenos se han aprovechado tanto en dosimetría personal, ambiental e industrial. Si bien se han estudiado y caracterizado un gran número de materiales luminiscentes, varios de ellos suelen presentar una sub- o sobre- respuesta comparada con la dosis depositada en tejido humano debido a que estos materiales no son tejido-equivalentes (T-E). Esto hace que dichos compuestos se comporten frente a la radiación de manera diferente al tejido tratado, dificultando así su aplicabilidad directa en radioterapia. En este contexto, este trabajo presenta las propiedades dosimétricas de topacios sintéticos para su posible aplicación como dosímetro.

*Palabras clave:* Dosimetría, radioterapia, materiales tejido-equivalentes

## Abstract

**Study of dosimetric properties of synthetic topazes.** When a dielectric or semiconductor is irradiated, charges excited by ionizing radiation can relax through radiative transitions emitting light (radioluminescence, RL) or can be trapped in metastable centers or traps for very long times. Once the irradiation is completed, the radiative relaxation of these trapped charges can be stimulated by increasing the temperature of the material (thermoluminescence, TL) or by stimulating it optically (optically stimulated luminescence, OSL). Since in general the intensity of the light emitted during irradiation is proportional to the dose,

both phenomena have been applied in personal, environmental and industrial dosimetry. Although a large number of luminescent materials have been studied and characterized so far, several of them usually present a sub- or over-response compared with the dose deposited in human tissue because these materials are not tissue-equivalent (T-E). This causes such compounds to behave upon radiation differently from the treated tissue, its direct application in radiotherapy is not straightforward. In this context, this work focuses on the dosimetric properties of synthetic topaz for its possible application as dosimeter.

*Key words:* Dosimetry, radiotherapy, tissue-equivalent materials

## 1. Introducción

En la actualidad existen varios tratamientos terapéuticos como la radioterapia de intensidad modulada, la radioterapia helicoidal, la radiocirugía y la radioterapia estereotáctica entre otros, que dan lugar a deposición de altas dosis de radiación en campos pequeños [1] y en este aspecto, se requiere de una dosimetría en vivo y en tiempo real (EV-TR). Entre las tecnologías disponibles para dosimetría EV/TR podemos mencionar las cámaras de ionización, los diodos y los detectores de diamante pero las cámaras no son utilizadas para dosimetría in-vivo debido a su fragilidad, su gran tamaño y la necesidad de conexiones eléctricas con alta tensión. Los diodos sí se utilizan habitualmente para dosimetría EV/TR pero su respuesta presenta fluctuaciones con la temperatura y la dosis acumulada [2] y como su respuesta no es equivalente al tejido blando es necesario encapsularlos aumentando el tamaño del dispositivo y haciendo prohibitivo su uso en ciertos tipos de dosimetría en campos pequeños [3]. Por último, los detectores de diamante que sí son tejido-equivalentes y proveen una alta resolución espacial, presentan dependencia con la tasa de dosis, son costosos y requieren protocolos de pre-irradiación antes de su uso [4-6]. En los últimos tiempos, la técnica de dosimetría por fibra óptica parece ir ganando terreno a la hora de una nueva opción para mediciones EV/TR debido a que provee alta resolución espacial, no requiere conexiones eléctricas en la proximidad del paciente, es reusable, mecánicamente robusta y de bajo costo [7]. El desafío actual consiste en el desarrollo de nuevos materiales luminiscentes para ser aplicados por medio de esta técnica.

Existen dos técnicas las cuales pueden ser utilizadas para dosimetría EV/TR, la RL y la OSL. Por un lado tenemos la RL, la cual la podemos asociar directamente con la técnica de dosimetría por fibra óptica (DFO). La DFO consiste en el uso de un material centellador de muy pequeño tamaño o polvo, adherido al extremo de una fibra óptica (FO). Al ser irradiado, la luz emitida por el centellador (RL) es transportada por la FO hasta su otro extremo, donde un detector de luz adecuado mide su intensidad. A partir de esta última y de una adecuada calibración, es posible determinar la tasa de dosis absorbida por el centellador en tiempo real [8]. Además, la DFO provee alta resolución espacial, no requiere

conexiones eléctricas en la proximidad del paciente, es reusable, mecánicamente robusta y de bajo costo [7]. Por otro lado tenemos a la dosimetría por OSL con la cual también se pueden realizar mediciones EV/TR a través de puntas dosimétricas, colocando un dosímetro OSL en el extremo de una FO y estimulando el dosímetro por el otro extremo de manera pulsada a través de un láser mientras se está irradiando. Luego, midiendo la señal de luz que llega del dosímetro a través de la FO hasta un detector de luz situado al otro extremo de la FO y mediante una correspondiente calibración, se puede obtener la dosis depositada [9].

Si bien se han estudiado y caracterizado un gran número de materiales luminiscentes para ser utilizados como dosímetros RL, OSL y TL [10-20], se ha encontrado que a la hora de evaluar su aplicabilidad como dosímetros en radioterapia estos materiales suelen presentar una sub- o sobre-respuesta comparado con la dosis real depositada debido principalmente a que la mayoría de los materiales investigados no son tejido-equivalentes (T-E) ( $Z_{eff} \approx 7,4$ ) lo que hace que se comporten frente a la radiación de manera diferente a la del tejido blando tratado.

En este trabajo se presenta la caracterización luminiscente y dosimétrica de diferentes topacios sintéticos cuyo número atómico efectivo ( $Z_{eff} \approx 11$ ) es bastante más cercano al del tejido blando que el de los demás compuestos investigados anteriormente. Finalmente, se evalúa su posible aplicación como dosímetro.

## 2. Experimental

Las muestras estudiadas en este trabajo fueron fabricadas en el grupo del Dr. M.I. Pech-Canul del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo, Coahuila, México. La síntesis de los topacios se realizó de manera sistemática y metodológica por la técnica de Deposición Química de Vapor (CVD - Chemical Vapor Deposition) en sistemas híbridos usando como precursor hexafluorosilicato de sodio ( $Na_2SiF_6$ ) y como reactivos óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), hidróxido de aluminio ( $Al(OH)_3$ ) o caolinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) [21-23]. Luego, las muestras se trituraron en un mortero de ágata y se tamizaron.

Todas la irradiaciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente con una fuente de electrones de  $^{90}Sr$  de  $3.7 \times 10^8$  Bq, lo que entrega una tasa de dosis de  $0.022$  Gy.min $^{-1}$  en la posición de la muestra.

Las mediciones de RL se obtuvieron en función del tiempo con la misma fuente de electrones de  $^{90}Sr$ . La luz emitida por las muestras se recogió por medio de una fibra óptica de comunicación de 1 mm de diámetro y se proyectó en un tubo fotomultiplicador Sens-Tech P25PC-02 (PMT) de conteo de fotones con sensibilidad entre 180 y 630 nm.

Los espectros de RL se registraron mediante un monocromador Acton Research SP-2155 de 0.150 m con el PMT mencionado anteriormente. Todos los espectros se midieron a una velocidad de 10 nm.min<sup>-1</sup>. Las muestras se colocaron en la ranura de entrada y se irradiaron con la fuente de electrones, que estaba situada a 1 cm de distancia de la muestra. Tanto las ranuras de entrada como de salida se ajustaron a un ancho de 3 mm durante las mediciones, lo que resultó en una resolución de aproximadamente 10 nm.

Para la estimulación óptica en las mediciones de OSL se utilizaron tres diferentes LEDs: un LED verde Luxeon V Star con máxima emisión a 530 nm, un LED azul Luxeon V Star con máxima emisión a 470 nm y un LED rojo Luxeon III Star con máxima emisión a 627 nm. En cada caso, la luz LED se filtró por medio de dos filtros pasa-altos Schott de 3 mm de espesor antes que llegue a la muestra. En particular, se usaron filtros de pasa-altos Schott OG570, OG530 y GG420 cuando se estimulaba con rojo, verde y azul, respectivamente.

Para eliminar la luz de estimulación, se interpusieron dos filtros pasa-banda Hoya B-390 o dos Hoya U-340 de 3 mm de espesor con transmisión entre 320 y 500 nm y 250 y 390 nm, respectivamente; entre la muestra y el detector de luz. La señal OSL fue detectada por medio del PMT mencionado anteriormente. Para todas las mediciones, tanto la irradiación como la estimulación se aplicaron a la misma cara de la muestra desde la cual se detectó la luz emitida.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. El topacio ( $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH},\text{F})_2$ )

El topacio es un mineral perteneciente al grupo de los aluminosilicatos, su fórmula empírica es  $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH},\text{F})_2$  en donde parte del flúor es comúnmente remplazado por grupos hidroxilo. Como se mencionó anteriormente, la síntesis de los topacios se realizó por medio de la técnica de Deposición Química de Vapor (CVD) usando como precursor hexafluorosilicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) y como reactivos óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) [21-23]. En este trabajo se analizarán las propiedades luminiscentes y dosimétricas de cada una de las síntesis propuestas.

La Figura 1 muestra el análisis de difracción de rayos X de las muestras obtenidas por CVD. Se puede ver la presencia de topacio  $\text{Al}_2\text{F}_{1.44}(\text{OH})_{0.56}\text{SiO}_4$  (◊) (ICDD 01-076-0480) tanto en la muestra obtenida a partir del hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) como en la obtenida a partir del óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). En esta última, también puede verse fluoruro de aluminio  $\text{AlF}_3$  (●) (ICDD01-080-1007) y alumina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (□) (ICDD 00-043-1484). Por otro lado, en la muestra obtenida a partir de la caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) puede verse también topacio  $\text{Al}_2\text{F}_2(\text{SiO}_4)$  (◆) (ICDD 01-087-0576) junto con óxido de silicio  $\text{SiO}_2$  (\*) (JCPDS No. 33-1161) y  $\text{Al}_{4.52}\text{Si}_{1.48}\text{O}_{9.74}$  (○) (JCPDS No. 79-1457).

A la derecha de la Fig. 1 se observan las micrografías SEM (Scanning Electron Microscope) representativas de la microestructura de las muestras estudiadas. Se puede ver que la micrografía SEM procesada a partir de caolinita muestra una morfología acicular, mientras que las procesadas a partir de óxido de aluminio se observan fibras y barras rectangulares en forma de dientes de león [22].

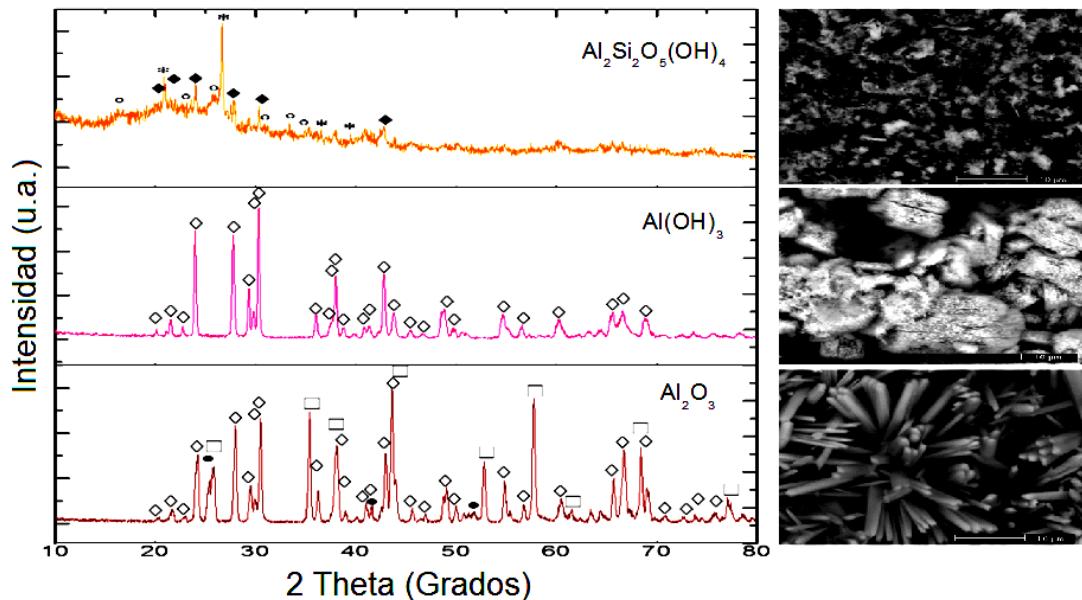


Fig. 1. Difracción de rayos X y micrografías SEM de las muestras obtenidas por CVD.

### 3.2 Caracterización de la emisión RL

En la Figura 2 se observan los espectros RL de las muestras estudiadas. Como puede verse en la figura, los espectros tienen una amplia banda de emisión centrada en 390 nm, la cual puede ser atribuida a centros  $(\text{H}_3\text{O}_4)^0$  también presentes en algunos cuarzos [24]. En general dos centros de color  $(\text{AlO}_4)^0$  y  $(\text{H}_3\text{O}_4)^0$  son observados típicamente en los cuarzos los cuales emiten en 460 y 380 nm, respectivamente.

Se puede ver también que el topacio formado a partir del hidróxido de aluminio tiene la máxima respuesta RL, la cual es más de dos y cinco veces mayor que la de las muestras procesadas a partir del óxido de aluminio y la caolinita, respectivamente. Este comportamiento podría deberse a la concentración de los centros de color  $(\text{H}_3\text{O}_4)^0$  mencionados anteriormente. Como estos defectos se forman cuando un ion  $3\text{H}^+$  sustituye un  $\text{Si}^{4+}$ , es decir, este centro está directamente relacionado con la presencia de iones de hidrógeno, es esperable que estos centros se produzcan en mayor concentración cuando se utiliza el hidróxido de aluminio ( $\text{Al(OH)}_3$ ) como reactivo en la síntesis. Además, mediciones adicionales realizadas

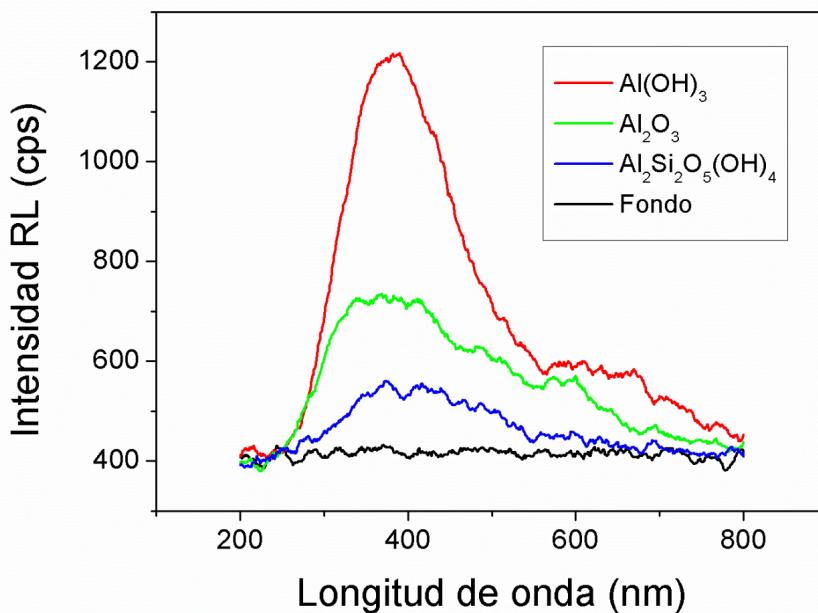


Fig. 2. Espectros RL de los diferentes topacios. La línea negra es la señal de fondo.

en muestras de topacio a partir de hidróxido de aluminio calentadas a 500°C mostraron que en todas ellas desaparece completamente la respuesta RL. Esto se encuentra en concordancia con estudios de otros autores que mencionan que el centro  $(\text{H}_3\text{O}_4)^0$  decae significativamente cuando la temperatura supera los 150°C [25]. Por lo tanto, la falta de respuesta RL después de los tratamientos térmicos y amplia banda de emisión centrada en 390 nm podrían justificar el postulado de que el centro  $(\text{H}_3\text{O}_4)^0$  es responsable de la emisión radioluminiscente en las muestras preparadas a partir del hidróxido de aluminio.

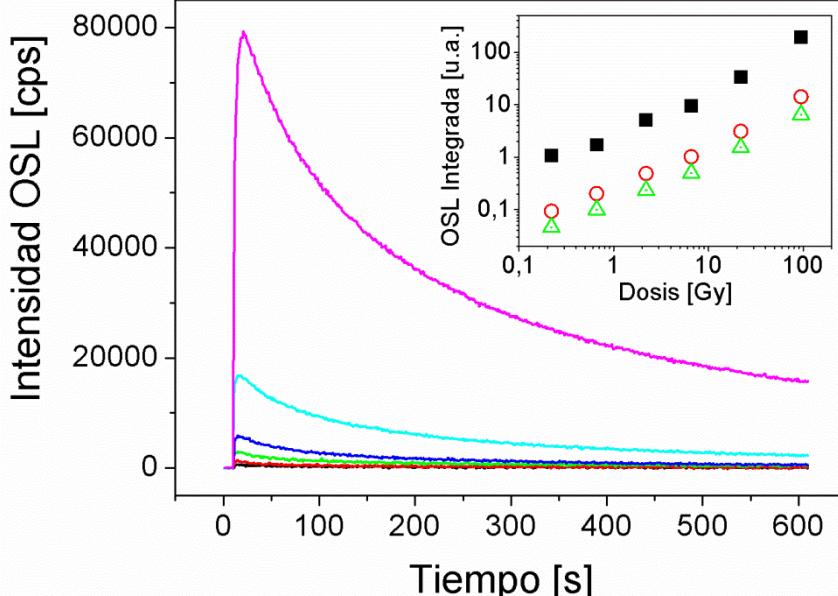
### 3.3 Caracterización de la OSL

En lo que respecta a las propiedades de la OSL de los topacios, en primer lugar se realizaron mediciones preliminares de la señal OSL seleccionando las dos configuraciones de filtros de emisión y las tres fuentes de luz de estimulación (rojo, verde y azul) como se detalló en la parte Experimental.

Cuando las muestras se estimularon con luz roja y verde, se evaluaron ambas configuraciones de filtros de emisión (Hoya B-390 y Hoya U-340), mientras que cuando se estimularon con luz azul, solo se investigó la configuración con los Hoya U-340 debido a la superposición de la longitud de onda entre esta la luz azul y los Hoya B-390. De todas las configuraciones investigadas, sólo cuando se estimuló con luz azul y se usó los filtros de emisión Hoya U-340, se obtuvo respuesta OSL, independientemente del topacio estudiado. En este contexto, los

resultados que se muestran a continuación se obtuvieron con esta última configuración.

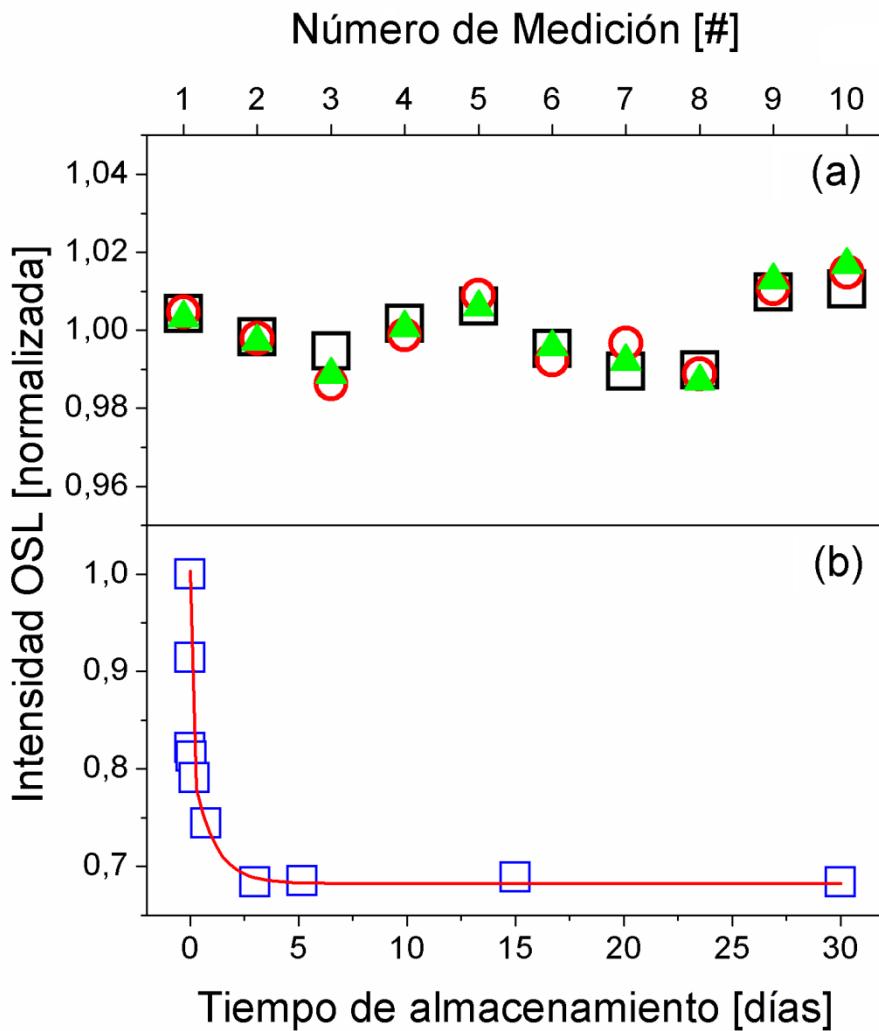
De los topacios analizados, se encontró que el topacio sintetizado utilizando óxido de aluminio como reactivo muestra la mayor respuesta OSL, mientras que las muestras procesadas a partir de hidróxido de aluminio y caolinita muestran respuestas que son más de dos órdenes de magnitud menor que las del primero. Esto está en concordancia con un trabajo previo [21] donde se obtuvo un comportamiento similar para la TL de los topacios.



**Fig. 3.** Curvas OSL del topacio sintetizado a partir del óxido de aluminio. En el recuadro, respuesta en dosis cuando se integran los primeros 10 (triángulos verdes), 20 (círculos rojos) y 600 (cuadrados negros) segundos, respectivamente.

La Figura 3 muestra las curvas OSL del topacio más eficiente, es decir, el sintetizado usando el óxido de aluminio como reactivo. Se puede ver en la figura las curvas OSL cuando se irradia la muestra con una dosis de 0.22, 0.66, 2.2, 6.6, 22 y 100 Gy, de abajo hacia arriba, respectivamente. En el recuadro inserto en la figura 3, se muestra la respuesta OSL en función de la dosis cuando se integra los primeros 10 (triángulos verdes), 20 (círculos rojos) y 600 s (cuadrados negros) de la curva OSL. Se puede obtener una buena linealidad en el rango de dosis de 0.22–22 Gy y un comportamiento supralineal si se tiene en cuenta la última dosis de 100 Gy. Si se realiza una regresión lineal en todo el rango de dosis, se encuentra un coeficiente de regresión igual a 0.999 para los dos primeros casos (10 y 20 s.) y de 0.996 para los 600 s. En este último caso, es posible que el coeficiente de regresión sea más bajo que el de los otros, porque mientras que para las dosis bajas las curvas OSL llegaron a cero, no sucede lo mismo para las dosis altas. De todas

formas, es posible mejorar más aún el coeficiente de regresión si se analiza el rango de dosis acotado sin tener en cuenta la dosis mayor, es decir, de 0,22 a 22 Gy.



**Fig. 4.** (a) Repetitividad de la respuesta OSL cuando se integra los primeros 10 (círculos rojos), 20 (triángulos verdes) y 600 (cuadrados negros) segundos, respectivamente. (b) Respuesta OSL en función del tiempo de almacenamiento.

Para evaluar la viabilidad de utilizar este compuesto como dosímetro OSL, se determinaron además otras propiedades dosimétricas de OSL, como la repetitividad de la señal OSL, el fading (desvanecimiento de la señal de OSL en función del tiempo de almacenamiento) y la dosis mínima detectable. La figura 4 (a) muestra la repetitividad de la señal OSL normalizada cuando se integra los primeros 10 (triángulos), 20 (círculos) y 600 (cuadrados) segundos de la curva OSL, encontrando una desviación estándar de la respuesta de 1.5, 1.7 y 1.1%, respectivamente. En todos los casos, las muestras se irradiaron con una dosis de

2.2 Gy y se leyeron 2 h después de la irradiación para eliminar completamente la componente rápida de fading.

Con respecto al fading de la señal OSL, la figura 4 (b) muestra los resultados del fading de la señal OSL para diferentes tiempos de almacenamiento en oscuridad y a temperatura ambiente. La muestra fue irradiada con una dosis de 2.2 Gy y se observa que la señal OSL disminuye hasta un 70%, después de lo cual la señal permanece constante. Para caracterizar el decaimiento de la señal OSL, se realizó un ajuste con una función doble exponencial y se obtuvieron tiempos de vida de 0.23 y 23 h, respectivamente. Este hecho evidencia que al menos dos tipos de trampas están involucradas en el mecanismo OSL. El mismo comportamiento se observó en un trabajo anterior [21] para el estudio del fading TL de este compuesto, el cual podría relacionarse con las trampas poco profundas presentes en el topacio.

Finalmente se calculó la dosis mínima detectable (MDD) la cual se define como  $MDD = 3 \sigma_{BG}$ , siendo  $\sigma_{BG}$  la desviación estándar experimental de la señal de fondo medida utilizando el mismo detector y una muestra no irradiada. El valor obtenido para la muestra más eficiente, es decir, el topacio sintetizado usando el  $Al_2O_3$  como reactivo, fue  $MDD = 0.01$  Gy.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se presenta el estudio de las propiedades RL y OSL de topacios sintetizados por deposición química de vapor utilizando  $Na_2SiF_6$  como precursor y tres reactivos compactos diferentes, como son el óxido de aluminio, el hidróxido de aluminio y la caolinita. Se encontró que el topacio se forma en una gran variedad de morfologías y la mayor respuesta RL se encontró en las muestras de topacio sintetizadas utilizando hidróxido de aluminio como reactivo. Esto se puede explicar por la existencia de centros de color  $(H_3O_4)^0$ , los cuales emiten en 390 nm y están relacionados con la presencia de hidrógeno, que es más probable que esté presente en muestras preparadas a partir de hidróxido de aluminio que en muestras procesadas a partir de los otros reactivos. La atribución de la RL a los centros de color  $(H_3O_4)^0$  se corroboró calentando las muestras a 500 °C, después de lo cual no se observó emisión de RL.

En cuanto a las propiedades dosimétricas OSL, el topacio sintetizado utilizando  $Al_2O_3$  como reactivo fue el que mostró la mayor respuesta OSL, mientras que las muestras procesadas con hidróxido de aluminio y caolinita muestran una respuesta dos órdenes de magnitud inferior a la primera. Independientemente del topacio estudiado, solo cuando se estimuló las muestras con una longitud de onda centrada en azul, se obtuvo una respuesta OSL. Con esta configuración, se encontró que el topacio sintetizado utilizando  $Al_2O_3$  como reactivo presentó una respuesta lineal en el rango de dosis estudiado (0.2 - 22 Gy) y una dosis mínima detectable de 0.01 Gy. Además, el estudio de repetitividad de la señal OSL mostró una desviación estándar de 1.5, 1.7 y 1.1% cuando se integra los primeros 10, 20 y 600 s de la curva OSL, respectivamente. El estudio de fading mostró que la señal OSL

disminuye hasta 70% y luego permanece constante. Dicho fading se caracterizó con una doble función exponencial con dos tiempos de vida de aproximadamente 0,23 y 23 h, respectivamente. Este hecho evidencia que al menos dos tipos de trampas están involucradas en el mecanismo OSL que podría estar relacionado con las trampas poco profundas presentes en el topacio.

Los resultados de este trabajo muestran que el topacio sintético cuyo número atómico efectivo es cercano al del tejido blando, podría considerarse tanto como dosímetro RL (si se usa el topacio sintetizado utilizando hidróxido de aluminio como reactivo) u OSL (usando el topacio sintetizado a partir del óxido de aluminio).

## Agradecimientos

Este trabajo es parcialmente financiado por el proyecto PICT 2015-2647 (ANPCyT, Argentina) y se basa principalmente en las referencias [21-23]. Agradezco a mis colegas M.I. Pech-Canul, E. Trujillo-Vázquez y L. Camargo, coautores de dichos trabajos y al Instituto de Física Arroyo Seco (IFAS), al Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCBA).

## Referencias

- [1] M. Taylor, T. Kron & R.D. Franich, *Acta Oncol.* **50**, 483 (2011).
- [2] E. Spasic, S. Magne, I. Aubineau-Laniece, L. de Carlan, C. Malet, C. Ginestet & P. Ferdinand, *Adv. Nucl. Instrum. Meas. Meth. Appl. (ANIMMA) Proceed.* 1 (2011).
- [3] J. Morin, D. Bélineau-Nadeau, E. Chung, J. Seuntjens, D. Thériault, L. Archambault, S. Beddar & L. Beaulieu, *Med. Phys.* **40**, 011719 (2013).
- [4] C. Angelis, M. Bucciolini, D. Visconti, B. Marczevska & S. Onoria, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **612**, 576 (2010).
- [5] D.A. Low, J.M. Moran, J.F. Dempsey, L. Dong & M. Oldham, *Med. Phys.* **38**, 1313 (2011).
- [6] R. Melendrez, M. Schreck, V. Chernov, S. Preciado, M. Pedroza & M. Barboza, *Phys. Stat. Sol. A: Appl. Mater. Scie.* **12**, 3167 (2012).
- [7] K.-A. Kim, W.J. Yoo, K.W. Jang, J. Moon, K.-T. Han, D. Jeon, J.-Y. Park, E.-J. Cha & B. Lee, *Rad. Prot. Dosim.* **153**, 294 (2013).
- [8] A.S. Beddar, T.R. Mackie & F.H. Attix, *Phys. Med. Biol.* **37**, 1883 (1992).
- [9] C.E. Andersen, S. Greilich & J. Helt-Hansen, *Med. Phys.* **36**, 708 (2009).
- [10] J. Marcazz, M. Santiago, E. Caselli, N. Nariyama & N.M. Khaidukov, *Opt. Mater.* **26**, 65 (2004).

- [11] J. Marcazzó, J. Henniger, N.M. Khaidukov, V.N. Makhov, E. Caselli & M. Santiago, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 5055 (2007).
- [12] J. Marcazzó, M Santiago, C Dangelo, C. Furetta & E Caselli, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B* **268**, 183 (2010).
- [13] J. Marcazzó, E. Cruz-Zaragoza, Vu Xuan Quang, N.M. Khaidukov & M. Santiago, *J. Lumin.* **131**, 2711 (2011).
- [14] P. Molina, M. Santiago, J. Marcazzó, F. Spano, N. Khaidukov & E. Caselli, *Rad. Meas.* **46**, 1361 (2011).
- [15] M. Santiago, J. Marcazzó, C. Grasselli, A. Lavat, P. Molina, F. Spano & E. Caselli, *Radiat. Meas.* **46**, 1488 (2011).
- [16] P. Molina, M. Santiago, J. Marcazzó, F. Spano, J. Henniger, W. Cravero & E. Caselli, *Appl. Radiat. Isot.* **71**, 12 (2012).
- [17] J. Marcazzó, M. Santiago, V.N. Makhov, Vu Phi Tuyen, N.M. Khaidukov & E. Caselli, *J. Lumin.* **140**, 82 (2013).
- [18] C. Guarneros-Aguilar, E. Cruz-Zaragoza, J. Marcazzó, R. Palomino-Merino, & J. E. Espinosa, *AIP Conf. Proceed.* **1544**, 70 (2013).
- [19] J. Marcazzó, L. Camargo, N.M. Khaidukov & M. Santiago, *J. Lumin.* **164**, 112 (2015).
- [20] L. Camargo, L. Pérez Cruz, E. Cruz-Zaragoza, S. Martínez Ovalle & J. Marcazzó, *Appl. Radiat. Isot.* **141**, 219 (2018).
- [21] E. Trujillo-Vázquez, M.I. Pech-Canul & J. Marcazzó. *J. Alloys Compd.* **689**, 500 (2016).
- [22] E. Trujillo-Vázquez, M.I. Pech-Canul & J. Marcazzó. *J. Alloys Compd.* **701**, 574 (2017).
- [23] L. Camargo, E. Trujillo-Vázquez, M.I. Pech-Canul & J. Marcazzó. *Radiat. Meas.* **107**, 23 (2017).
- [24] D.N. Souza, J. Fernandes de Lima, M.E.G. Valerio, C. Fantini, M.A. Pimenta, R.L. Moreira & L.V.E. Caldas, *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B*, **191**, 230 (2002).
- [25] N. Kristianpoller, R. Chen & M. Israeli, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **7**, 1063 (1974).

*Manuscrito recibido el 18 de marzo de 2019.  
Aceptado el 29 de marzo de 2019.*