

Práctica 1:

Radiaciones Ionizantes y Termo-luminiscencia

Orozco González Luis René

correo: reneg@ciencias.unam.mx

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Fecha de entrega:

8 de junio de 2020

Resumen

Se irradiaron con una fuente de betas, (^{90}Sr), dos tipos de materiales que presentan termoluminiscencia(TL), siendo estos cristales de TLD-100(Li:Mg,Ti) y de TLD-200($\text{F}_2\text{Ca:Dy}$). Para ver como respondían en relación con el tiempo de exposición, así como a la estimulación térmica que se le iría aplicando, (A diferentes tasas de crecimiento), a cada uno de los cristales y posteriormente obtener la variación de la curva de brillo. Mediante el uso del instrumento HARSHAW se obtuvieron los datos de intensidad de brillo en función de la temperatura. Se investigo sus propiedades ópticas mediante el tratamiento de datos, obteniendo de estó, resultados notables para los objetivos planteados. Como por ejemplo se encontró que la influencia de las condiciones de la irradiación, así como la estimulación térmica son importantes para verificar que la cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis absorbida por el material irradiado, además de que cada material tiene una curva característica.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades de un elemento químico quedan constituidas por los átomos que lo conforman, siendo, el átomo la unidad más pequeña de materia.[1] Un átomo se especifica a través de su número de neutrones y protones los cuales se simbolizan con las letras mayúsculas **N** y **Z** correspondientemente.



donde A es el numero de masa por lo cual es la suma de los neutrones y protones. Cuando algunos átomos de un elemento en específico presentan un numero distinto de neutrones se le llama isótopos, mientras que si N y Z tienen valores específicos se les conoce como nucleido y por lo tanto cuando existe una diferencia entre el numero de neutrones y protones se le conoce como radionucleido esto es por que existe una inestabilidad en el átomo lo que da paso a la radiactividad la cual se define como la emisión espontánea de partículas procedentes de la desintegración de determinados nucleidos que las forman, por causa de un arreglo en su estructura interna ($Z \neq N$). Los radionucleidos se caracterizan por el tipo de radiación que emiten y su vida media la cual se define como el tiempo que le toma a una muestra para que su actividad disminuya a la mitad, siendo la actividad la velocidad con la cual los núcleos de una muestra decaen o pierden energía al emitir partículas o radiación.

■ Actividad

$$R = -\frac{dN}{dt} \quad (1)$$

■ Vida media

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2)$$

Donde: R es la actividad, N es el numero de núcleos en la muestra en el tiempo t y λ es la constante de decaimiento.

Si desarrollamos la ecuación 1 para cualquier muestra encontramos que el decaimiento es exponencial obedeciendo a la siguiente expresión:[2]

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

En el sistema internacional S.I. la unidad para la actividad es el bequerel siendo:

$$1\text{Bq} = \frac{\text{decaimiento}}{\text{segundo}}$$

Otra unidad es el Curie

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \frac{\text{decaimiento}}{\text{segundo}} = 37\text{GBq}$$

En condiciones normales de equilibrio, las partículas del átomo permanecen fuertemente unidas, como si estuvieran atadas. Pero un exceso o una falta de neutrones pueden romper ese equilibrio. Entonces se convierten en elementos inestables con tendencia a transformarse en otros elementos inestables. Para que esto ocurra las ataduras tienen que romperse y formar otras nuevas. A este cambio se le llama desintegración radiactiva, se produce liberando una gran cantidad de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas indivisibles y silenciosas llamadas radiaciones.

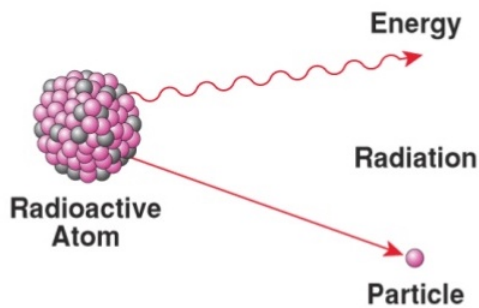


Figura 1: Diagrama de un átomo emitiendo radiación y partículas a causa de una inestabilidad en su estructura interna. Imagen tomada de pagina web: <https://www.slideshare.net/ryanko1612/27radioactivity>

Parte de la masa del cuerpo se transforma en energía, de acuerdo con la formula de Einstein:

$$E = mc^2 \quad (4)$$

1.1. Radiaciones Ionizantes

Las radiaciones ionizantes están formadas por partículas o por ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia con la suficiente energía como para producir ionización de un átomo y romper sus enlaces atómicos que mantienen las moléculas unidas en las células. Estas alteraciones pueden ser más o menos graves dependiendo de la dosis recibida.

1.2. Tipos de radiación ionizantes

Las radiaciones ionizantes se clasifican según su frecuencia, lo que da origen a tres tipos de radiaciones las alfa (α), las beta (β) y las gamma (γ). A continuación se hace una pequeña descripción de estas radiaciones.

- Las radiaciones alfa: Son núcleos de Helio-4, (^4He), que se emiten en determinadas desintegraciones nucleares y que están formados por dos neutrones y dos protones. Tienen mucha masa lo que los hace poco penetrantes ya que agotan su energía muy rápido en distancias cortas, de hecho una hoja de papel o la misma piel humana son suficientes para protegernos de sus efectos.
- Las radiaciones beta: Son un flujo de electrones (betas negativas) o positrones (betas positivas) liberados en determinadas desintegraciones nucleares. Tienen menos masa que las alfa, aunque son algo más penetrantes: pueden traspasar una hoja de papel y entre uno y dos centímetros de tejido vivo, pero no pueden penetrar una lámina de aluminio.
- Los rayos X y gamma: Son radiaciones electromagnéticas sin carga ni masa. Las radiaciones Gamma proceden de la desintegraciones de los núcleos

inestables de algunos elementos radiactivos y los rayos X proceden de las capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones. Este tipo de radiaciones son bastante penetrantes, atraviesan la hoja de papel, la lámina de aluminio y para frenarlas se precisa una placa de plomo de grosor suficiente.

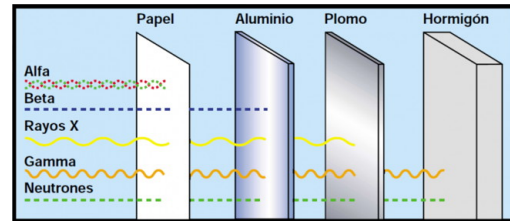


Figura 2: Diferentes tipos de radiaciones ionizantes. Imagen tomada de pagina web: <https://revistamedica.com/wp-content/uploads/2020/02/radiaciones-inonizantes.jpg>

Para detectar la presencia de radiaciones y medir su cantidad se utilizan unos instrumentos específicos llamados 'detectores' y/o 'dosímetros' la magnitud que define la 'cantidad' de radiación recibida se llama dosis absorbida y su unidad es el gray (Gy). Dependiendo del tipo de radiación una misma dosis absorbida puede dar lugar a diferentes efectos biológicos en los seres vivos, por lo cual definimos esta magnitud llamada dosis equivalente, cuya es el Sievert (Sv).

1.3. Luminiscencia

La luminiscencia es la emisión de la luz de un sólido llamado fósforo.[3] La emisión luminiscente ocurre como resultado de una transición electrónica radiactiva en la cual, un electrón pasa de un nivel de energía mayor a uno más bajo. La diferencia en energía emitida en forma de un fotón previamente a la emisión, el electrón fue excitado a un nivel de energía mayor por algún método de excitación, por ejemplo radiación electromagnética.

La luz emitida por el material es de una longitud de onda mayor a la incidente (Ley de Stokes).[4] La longitud de onda de la luz emitida es característica de cada material.

Existen distintos fenómenos de luminiscencias los cuales reciben nombres dependiendo del tipo de excitación de la que se absorbe energía. Algunos ejemplos son:

- Bioluminiscencia (excitando por medio de reacciones bioquímicas)
- Catoluminiscencia (rayos catódicos)
- Quimioluminiscencia (por reacciones químicas)
- Electroluminiscencia (por un campo eléctrico)
- Piezoluminiscencia (por presión)
- Radioluminiscencia (Por radiación ionizante)

- Fotoluminiscencia (Por medio de la luz visible o ultravioleta)
- Termoluminiscencia (Por liberación térmica de energía almacenada en un sólido previamente excitado con radiación ionizantes).

De acuerdo al tiempo característico τ que transcurre entre la excitación y la luminiscencia, esta se clasifica en fluorescencia o fosforescencia.

La fluorescencia es el fenómeno luminiscencia en el cual la emisión de la luz se da en periodos de tiempo menores a $10^{-9}s$ después de la excitación previa y se detiene inmediatamente cuando este cesa. El tiempo de decaimiento de la fluorescencia es independiente de la temperatura. El mecanismo de la fluorescencia esta determinado por la probabilidad de la transición electrónica de un nivel excitado E_e a su estado base E_0 .

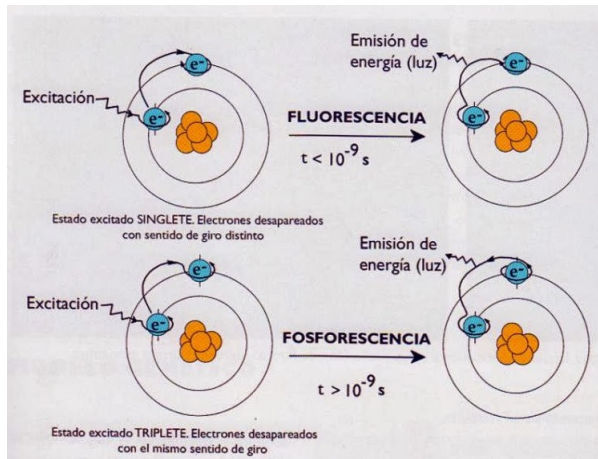


Figura 3: Modelo de emisión de fluorescencia y fosforescencia. Imagen tomada de pagina web: <https://elbioanalista.blogspot.com/2017/10/luminiscencia-tipos.html>

Por otra parte la fosforescencia se caracteriza por un retraso entre la absorción de la energía y la luminiscencia toma lugar en tiempos mayores a $10^{-9}s$ además que esta continua después de que la fuente de la excitación ha sido removido. El tiempo de decaimiento es dependiente de la temperatura.

La presencia de luminiscencia persistente, o afterglow, para el caso de la fosforescencia es debido a la presencia de estados meta-estables o trampas, m , localizadas en la banda de energía prohibida o gap del material luminiscente. Para este caso, cuando un electrón es excitado de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC), ahora puede ser atrapado en m , donde puede permanecer por un tiempo determinado, hasta recibir la energía necesaria para ser excitado de nuevo a la banda de conducción, para regresar a la banda de valencia, con la emisión de la luz subsecuente.

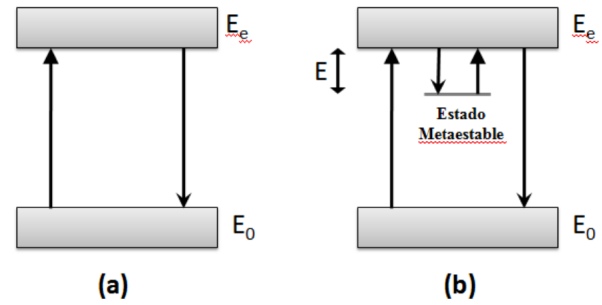


Figura 4: Representación gráfica de los procesos de fluorescencia (a) y fosforescencia (b). Imagen tomada de pagina web: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20721/Marco>

1.4. Luminiscencia Térmicamente Estimulada

El fenómeno de luminiscencia estimulada térmicamente, comúnmente llamado termo-luminiscente (TL), es la emisión de la luz de un aislante o un semiconductor cuando este es calentado, con previa absorción de energía con radiación ionizante.

Desde un punto de vista microscópico la TL consiste en la perturbación del sistema electrónico de un aislante o semiconductor, de su estado de equilibrio termodinámico, mediante la absorción de energía externa, producida por la radiación ionizante, hacia un estado meta-estable. Seguido de una estimulación térmica, se presenta una relajación del sistema, regresando a su estado de equilibrio. Por otra parte, observando el fenómeno de la TL desde un punto de vista macroscópico, es la emisión de luz estimulando térmicamente, una vez que ha sido retirada la fuente de excitación.

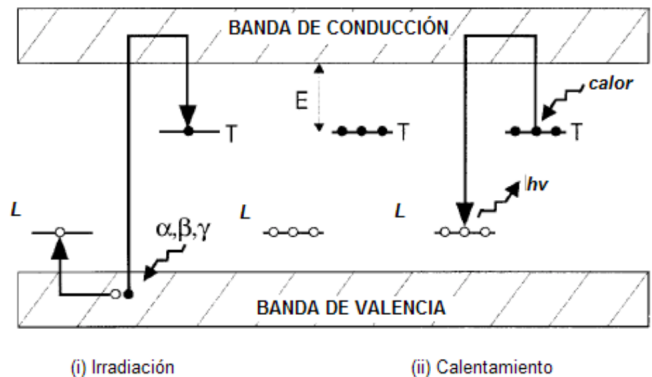


Figura 5: Representación esquemática de un experimento de TL. Imagen tomada de pagina web: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20721/Marco>

De acuerdo a su definición, la TL es un fenómeno de fosforescencia, el cual se encuentra directamente relacionado con la estructura de bandas de los sólidos y principalmente con la presencia de defectos, los cuales dan lugar a estados

localizados en la banda prohibida (E_g).

La importancia de la práctica es identificar como se modifica la respuesta termoluminisciente en relación con las variables radiológicas asociadas (Tiempo de exposición a la fuente radiactiva y la tasa de crecimiento de la estimulación térmica), además verificar que la cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis absorbida por el material irradiado.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1. Objetivos

- Identificar como se modifica la respuesta termoluminisciente en relación con las variables radiológicas asociadas a la fuente utilizada (^{90}Sr) o la geometría de irradiación.
- Obtener las curvas de intensidad luminica de los cristales TLD-100(LiF:Mg,Ti) y de TLD-200($\text{F}_2\text{Ca:Dy}$) irradiados con una fuente de betas (^{90}Sr) en función de temperatura a diferentes tasas de crecimiento de temperatura ($\frac{^\circ\text{C}}{\text{s}}$), para observar la variación de la curva de brillo.

2.2. Materiales

En este experimento se utilizaron en total diez muestras TLD (cristales que presentan termoluminiscencia), cinco de TLD-100(LiF:Mg,Ti) y otras cinco de TLD-200($\text{F}_2\text{Ca:Dy}$), también se utilizó un lector HARSHAW TLD3500 para estimular térmicamente las muestras después de haber sido irradiadas por la fuente, en este caso se utilizó; Una fuente de estroncio-90 con una actividad de 6.7 MBq para verificar lo anterior se utilizó un contador Geiger TBM-23, también se utilizó un tanque de gas (nitrógeno puro) para el funcionamiento adecuado del lector, además de una computadora con el programa WinREMS para obtener los datos de intensidad de brillo, además se usó una mufla de marca Felisa Fe-340 para borrar cualquier información espuria o remanente (de algún uso previo) en los cristales antes de irradiarlos. Para nuestra protección se utilizó una pared de acrílico con grosor suficiente (4.00 ± 0.05)cm para poder manipular la fuente sin riesgo a ser irradiado de forma accidental, además se utilizaron pinzas y un portamuestras.

2.3. Desarrollo del experimento

Lo *primero* que se realizo fue poner en operación el Lector HARSHAW TLD3500 y la computadora con el software winREMS, para esto se enciende el lector activando el switch que se encuentra en la parte trasera del instrumento, al menos 20 minutos antes de comenzar a leer los TLD, esto para que se llegue a un desempeño óptimo. También 10 minutos antes de comenzar las lecturas se habré la válvula de paso del gas(nitrógeno puro), este ya tiene valores de flujo y presión previamente ajustados(Flujo

alrededor de 90 y presión alrededor de 22 psi) y por ultimo se enciende la computadora para abrir el programa WinREMS.

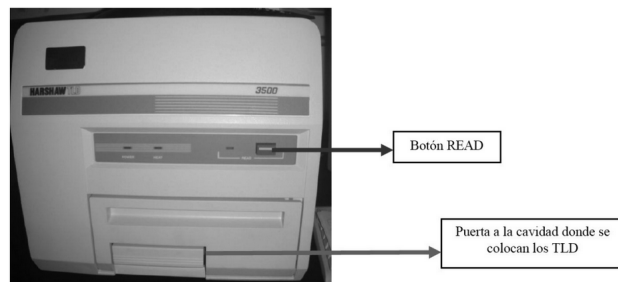


Figura 6: Lector HARSHAW TLD3500 *Imagen tomada del Protocolo de lectura de los dosímetros termoluminiscientes, Apéndice 4*

Ya teniendo en operación el lector se eligen los cinco TLD-100, colocándolos en el porta muestras(vease Figura 7), para meterlos a la mufla a una temperatura de 426°C esto para borrar cualquier información que se halle en estos. Para garantizar esto ultimo se dejo calentar durante 30 minutos.

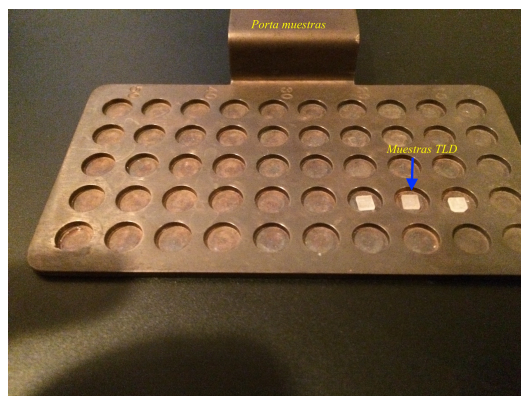


Figura 7: Portamuestras y cristales TLD *Imagen tomada por el autor: Orozco González Luis René*

Ya pasado los 30 minutos, extraemos el portamuestras del interior de la mufla con las pinzas de seguridad y se deja el portamuestras sobre una placa de aluminio para que tanto el portamuestras y los TLD lleguen al equilibrio térmico con el la temperatura ambiente para poder manipularlos y transportarlos con una pinza al soporte donde se irradiarían(véase Figura 8), se tomo la desición de irradiar las primeras cuatro muestras durante quince minutos y la quinta por cuarenta y dos horas.

Ya irradiados los cristales, uno por uno se transportan al lector para ponerlos en la cavidad (véase Figura 6), ya teniendo cerrada la compuerta se presiona el botón con la leyenda READ y se podrá ver en tiempo real el registro de la intensidad de luz, para cada cristal. Se programo una diferente tasa de crecimiento de temperatura en un intervalo de $[50 - 300]^\circ\text{C}$.

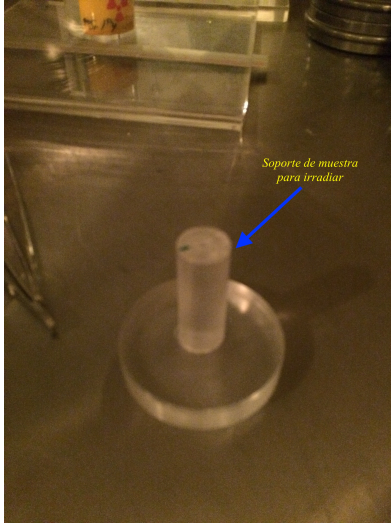


Figura 8: Soporte de muestras para irradiar, con capacidad de irradiar solo una muestra. *Imagen tomada por el autor: Orozco González Luis René*

Ya terminado las lecturas de los TLD-100 se realiza la misma operación con los TLD-200 solo cambiando el tiempo de exposición a la fuente de estroncio (^{90}Sr), siendo el tiempo exposición de diez minutos, además de programar nuevas tasas de crecimiento de temperatura que están dentro del intervalo de $[50 - 400]^{\circ}\text{C}$.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Para los TLD-100

Como se describió en la sección anterior se obtuvieron diez conjuntos de datos, que corresponden a la temperatura suministrada por el lector y la intensidad de brillo. En la tabla 1 se muestran los parámetros con que se trabajo con los TLD-100.

Num. Muestra	Tiempo de Irradiación [minutos]	TC [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]
1	15	5
2	15	10
3	2520	15
4	15	20
5	15	25

Tabla 1: Se presentan los parámetros con los que se trabajaron tanto el tiempo de exposición para cada uno de los TLD-100 a la fuente de estroncio-90 así como la tasa de crecimiento (TC) térmico que se le aplico con el instrumento HARSHAW.

En la figura 9 podemos observar las curvas de la intensidad de luz emitida por las muestras en función de la temperatura en un intervalo de cincuenta a trecientos celcius siendo esta ultima la temperatura máxima que se le aplico a las muestras TLD-100.

Se opto por normalizar cada curva a su valor máximo

para un mejor comparativo ya que cada curva presentaba diferente altura lo que hacia difícil su análisis. Ya normalizadas las curvas podemos observar (vease Figura 9) un claro desplazamiento con respecto al cambio de la tasa de crecimiento (TC) térmico de menor a mayor, lo cual nos indica que existe una temperatura critica (T_c) y una intensidad de brillo critica (I_c) que es el umbral o el punto donde la curva aumenta considerablemente y depende de la TC con la que opera el lector.

Para entender esto ultimo recordemos que las muestras fueron irradiadas lo que quiere decir que fueron perturbadas electrónicamente y visto desde de la teoría de bandas de los solidos lo que ha pasado a nivel microscópico con las muestras es que muchos de sus electrones de valencia fueron excitados por la energía ionizante de la fuente radiactiva y por tanto pasaron a un nivel superior que es la banda de conducción donde hubo una recombinación y pasado un tiempo los electrones perdieron energía lo que haría que empezaran a regresar a la banda de valencia, algunos de estos electrones quedarían en trampas localizadas en el Gap o banda de energía prohibida que en la literatura llaman estar en un estado meta-estable.

En el momento que estimulamos térmicamente el material nosotros estamos dándole al sistema energía lo que quiere decir que tanto los electrones que se encuentran en la banda de valencia, así como los que se encuentran en estados meta-estables pasen a un nivel superior dando de nuevo un proceso de recombinación entre electrones huecos, los electrones pierdan energía y pasan de un nivel superior(BC) a uno inferior ya sea si esto es un estado meta-estable o a la banda de valencia lo importante es que en este proceso la diferencia de energía es emitida en forma fotón.

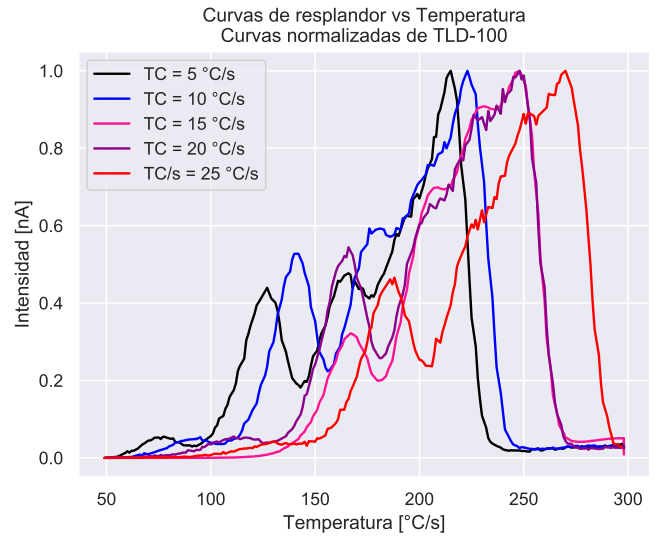


Figura 9: Termo-grama en función de las diferentes tasas de crecimiento térmico. *Gráfica generada con Python 3.7.x*

La razón de que obtengamos curvas de uno o varios

máximos, se debe al proceso de inyección térmica al sistema más que nada a los electrones, recombinación en la banda de valencia(BV), el pasar de un estado superior a uno inferior emitiendo en el camino fotones(esto lo sabemos por la intensidad de brillo) y como el sistema aun esta recibiendo estimulación térmica esto se vuelve a repetir dando paso a los diferentes máximos que vemos en los termo-gramas tanto de los TLD-100 y TLD-200.

En la Figura 10 y 11 se presenta el termo-grama con tasa de crecimiento $TC = 15 \frac{^{\circ}C}{s}$ y una gráfica de dispersión con los valores máximos de temperatura y de brillo. A esta ultima gráfica se le aplica una regresión lineal para obtener la tasa con la cual la intensidad de brillo cambia con la temperatura y el valor de intensidad de brillo critica.

Se eligió la curva de brillo con la tasa de crecimiento de $15 \frac{^{\circ}C}{s}$ por la razón de que los máximos están mejor definidos como consecuencia de haber sido irradiados durante 42 hrs. De la regresión lineal obtuvimos una pendiente positiva on valor de $m_1=(88037) \frac{nA}{^{\circ}C}$ y una ordenada al origen con valor de $b_1=(-1.13e+07)nA$.

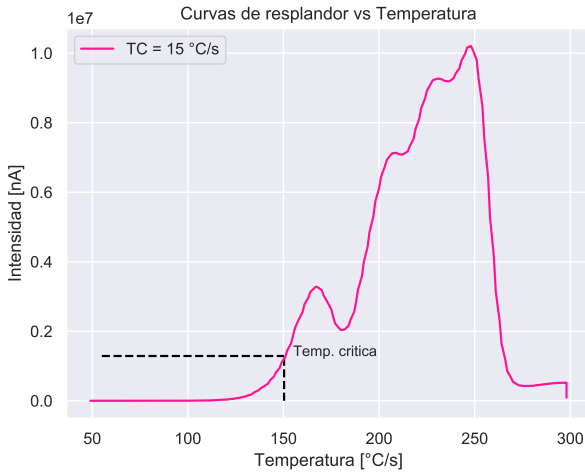


Figura 10: Termo-grama con tasa de crecimiento térmico de $15 \frac{^{\circ}C}{s}$ del solido irradiado por 42 hrs. *Gráfica generada con Python 3.7.x*

3.2. Para los TLD-200

Para el caso de los TLD-200 se realiza el mismo análisis, se presenta en la tabla 2 los datos del tiempo al que fue expuestos a la fuente de betas y las tasas de crecimiento.

Lo primero que destaca de la Figura 12 con respecto a la Figura 9 es que presenta dos máximos y otros dos más pequeños casi imperceptibles lo que implica una diferencia en las trampas que se hallan en la banda de energía prohibida (Gap) de los TLD-200.

Por otra parte es claro que también las curvas de brillo de los TLD-200 presentan desplazamiento en función de la tasa de crecimiento térmico que se le aplico a cada solido, se eligió un intervalo de cincuenta a cuatrocientos

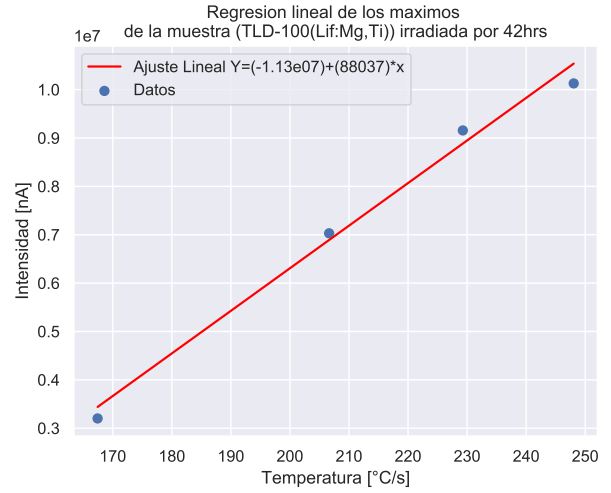


Figura 11: Regresión lineal generada con el paquete Scikit-learn 0.22.x, usando los maximos de temperatura. *Gráfica generada con Python 3.7.x*

Num. Muestra	Tiempo de Irradiación [minutos]	TC [$\frac{^{\circ}C}{s}$]
1	10	30
2	10	5
3	10	10
4	10	15
5	10	20

Tabla 2: Se presentan los parámetros con los que se trabajaron tanto el tiempo de exposición para cada uno de los TLD-200 a la fuente de estroncio-90 así como la tasa de crecimiento (TC) térmico que se le aplico con el instrumento HARSHAW.

celsius ya que al usar el mismo rango que los TLD-100 no se apreciaba bien la curva ya que como se puede observar en la Figura 12 las curvas presentan un rango mayor que las de la Figura 9. Lo anterior esta muy relacionado según la literatura con las profundidades de las trampas en el Gap y al numero de estas.[3] Lo que nos sugiere que tal vez el numero de trampas este íntimamente relacionado a cuantos máximos puede haber en la curva de brillo característica de cada material TLD.

Se le aplica a la curva de brillo de TLD-200 con tasa de crecimiento de $15 \frac{^{\circ}C}{s}$, un tratamiento estadístico con el paquete Scikit-learn 0.22.x, para poder determinar los máximos de la curva, para poder realizar una regresión lineal y obtener la intensidad de brillo critica y la tasa de brillo en relación con el estipulación térmica.

Como podemos observar en la Figura 13, obtuvimos una relación lineal con una pendiente negativa con valor de $m_2=(-5245.7)nA/^{\circ}C$ y la ordenada al origen con valor de $b_2=(1.66e+06)nA$ siendo este ultimo valor la intensidad de brillo inicial o el resultado de la diferencia de energía umbral necesaria para emitir fotones.

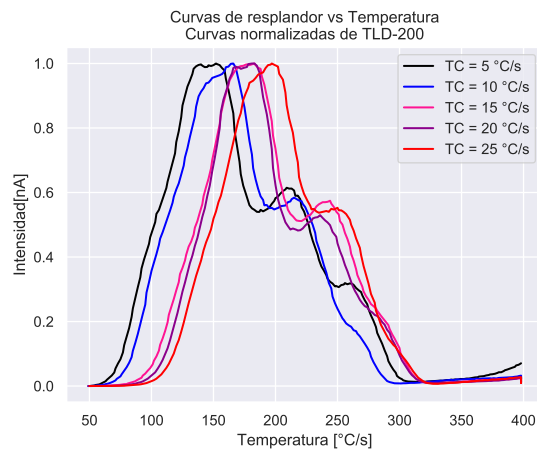


Figura 12: Termo-grama en función de las diferentes tasas de crecimiento térmico. *Gráfica generada con Python 3.7.x*



Figura 13: Regresión lineal generada con el paquete Scikit-learn 0.22.x, usando los maximos de temperatura. *Gráfica generada con Python 3.7.x*

4. CONCLUSIONES

- Los TLD's responden de diferente manera dependiendo de su composición química, además de que su respuesta esta sujeta a ciertas variables radiológicas como lo son el tiempo de exposición a la fuente radiactiva y que tan rápido calentamos el solido.
- Si se estimula varios TLD con la misma composición química, mismo tiempo de irradiación pero diferente tasa de crecimiento termico, las curvas presentaran un desplazamiento.
- Los solidos TLD-100 tienden a tener una curva creciente con varios máximos en contra parte con los TLD-200 que su curva crece demasiado rápido para después caer teniendo muy pocos máximos, lo que sugiere que los TLD-200 tienen menos trampas que los

TLD-100 pero estas son más profundas.

- Se verifica que la cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis absorbida por el material irradiado, esto se puede ver claramente comparando las Figuras 9 y la 10 ya que son del mismo material, pero fueron irradiados con diferente tiempo, presentando una curva mayor para la muestra de 42 hrs de exposición.

REFERENCIAS

- [1] Joseph J Thompson, Hans Geiger, Ernest Marsden, Ernest Rutherford, Henry Moseley, and James Chadwick. On the structure of the atom. *Phylos Mag*, 7: 237–265, 1904.
- [2] Arthur Beiser. *Concepts of modern physics*. Tata McGraw-Hill Education, 2003.
- [3] Frank Herbert Attix. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley & Sons, 2008.
- [4] George Gabriel Stokes. Xxx. on the change of refrangibility of light. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, (142):463–562, 1852.