



Instituto Politécnico Nacional



Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y
Tecnología Avanzada Unidad Legaria.

Síntesis de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$ y su Aplicación en el Campo de las
Radiaciones Ionizantes.

Tesis que para obtener el grado de Maestría en Tecnología
Avanzada Presenta:

Ing. Jesús Román López.

Director de Tesis: Dr. Teodoro Rivera Montalvo.

Julio 2009



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F. siendo las 2:30 horas del día 19 del mes de Junio del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-LEG para examinar la tesis de titulada:
Síntesis de CaSO₄:Dy y su Aplicación en el Campo de las Radiaciones Ionizantes.

Presentada por el alumno:

Román
Apellido paterno

López
Apellido materno

Jesús
Nombre(s)

Con registro:

B	0	7	1	7	2	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

Dr. Teodoro Rivera Montalvo

Dr. Juan Azorín Nieto

Dr. José Guzmán Mendoza

Dr. Ernesto Marín Moares

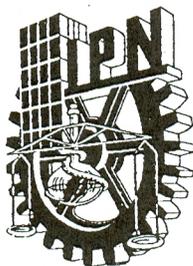
Dr. José Antonio Calderón Arenas

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora

CENTRO DE INVESTIGACION EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA

IPN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F. el día 19 del mes Junio del año 2009, el (la) que suscribe Jesús Román López alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B071726, adscrito a Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Legaria, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Teodoro Rivera Montalvo y cede los derechos del trabajo intitulado Síntesis de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$ y su Aplicación en el Campo de las Radiaciones Ionizantes, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección holand_jeos@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Jesús Román López

Agradecimientos.

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional por abrirme una vez más sus puertas para seguir cultivando mi intelecto y poder completar las metas y sueños que alguna vez considere.

Agradezco al CONACYT, becas PIFI y COFAA por confiar en la persona honesta que escribe estas palabras, por la contribución económica para terminar mis estudios de maestría y poder realizar los viajes a congresos.

Le doy mil gracias al Dr. Teodoro Rivera Montalvo por permitir ser uno de sus alumnos y más que nada por brindarme su amistad y apoyo en todo momento, por la confianza otorgada a lo largo de la maestría.

Al Dr. José Guzmán por apoyarme en la contribución a mi intelecto por cuestionarme siempre acerca de mis conocimientos adquiridos.

Agradezco al Dr. Juan Azorín Nieto por permitirme trabajar en el laboratorio de dosimetría termoluminiscente en la UAM-I.

A Gilberto Alarcón por sus conocimientos otorgados en química y por su gran ayuda durante la maestría, pero principalmente por brindarme su amistad y confianza.

A los compañeros del grupo de trabajo del área de física médica, Adriana Karina, Andrea, Francisco y Gabriel que me brindaron sus conocimientos y su amistad.

A los investigadores que participaron en mi jurado, gracias por sus comentarios y sugerencias para completar este trabajo de tesis y por su paciencia a la hora de explicarme sus observaciones.

Dedicada a:

A Hilda Esteva mi madre:

Que sin importar las circunstancias siempre confi6 en cada uno de sus hijos en los momentos difciles que vivimos.

A mis hermanos:

Por todo el apoyo, el cari6o, la confianza y las esperanzas otorgadas.

A Francisco Rom6n:

Que sin importar las circunstancias me brindo su apoyo en todo momento.

A Guillermo Rom6n:

Aunque no pude estar con 6l en momentos difciles siempre estar6 en mi coraz6n y memoria.

A Lluvia Ochoa y Roci6 L6pez:

Por brindarme su amistad, su apoyo en los momentos difciles y sobre todo por escucharme y aguantarme cuando les confiaba mis sentimientos

"El intelecto recibido con todas las ganas del mundo, es el que m6s se aprovecha y colabora a realizar los sue6os que los ni6os siempre han tenido."

Resumen.

La luminiscencia térmicamente estimulada con nombre común termoluminiscencia (TL) se basa en el principio de la luminiscencia en un material cuando es calentado por debajo de su temperatura de incandescencia, cuando este material ha sido previamente irradiado.

Los materiales termoluminiscentes nos permiten detectar la radiación ionizante y proporcionar valores cuantitativos que nos ayudan a determinar la energía depositada en un volumen dado. La eficiencia en la cuantificación de la energía depende de procesos tales como el método de síntesis.

El método propuesto para la síntesis de Sulfato de Calcio dopado con Disproso ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) se basa en la precipitación de soluciones iónicas, agregando una impureza en su estructura cristalina variando los porcentajes en peso de disproso desde 0.1 hasta 5 %. Este método resultó ser prometedor para la obtención de materiales termoluminiscentes policristalinos de alta pureza.

Para un mejor manejo y menor pérdida de información por la transportación de los polvos se decidió elaborar pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ utilizando teflón como material aglutinante en una proporción de 2:3.

Previamente a la caracterización dosimétrica, las muestras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ fueron sometidas a las siguientes técnicas de caracterización: microscopia

Resumen.

electrónica de barrido (MEB) para obtener la morfología, la difracción de rayos X (XDR) nos permite conocer la estructura, espectrometría de energía dispersiva (EDS) que determina la composición química del material. La incorporación del disprosio se observó mediante la técnica de espectroscopia UV-Vis.

Mediante el análisis de la señal termoluminiscente del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ se determinó que la concentración óptima del disprosio en la matriz de CaSO_4 fue de 1 % y para esta concentración se cumplen los requerimientos para poder ser aplicado en la dosimetría de radiación ionizante.

La curva TL del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ previamente expuesto a la radiación gamma de ^{60}Co y obtenida mediante el uso de un equipo lector TLD-3500 presentó dos picos dosimétricos alrededor de 153 y 287 °C respectivamente.

La respuesta en función de la dosis presentó una respuesta lineal en el intervalo estudiado (0.5 – 30 Gy). El desvanecimiento de la información del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ presenta una pérdida de 3.64 % durante los primeros dos días, a partir de este período y hasta los 39 días se tiene una pérdida del 5.19 %.

Analizando los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo se puede decir que el método de precipitación resulta ser favorable para sintetizar materiales termoluminiscentes de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ los cuales exhiben características dosimétricas altamente prometedoras para medir la radiación ionizante. Además de ser un método sencillo y no es agresivo con el medio ambiente.

Abstract.

Thermally stimulated luminescence commonly named thermoluminescence (TL) is based on the luminescence from a previously irradiated material when it is heated below its incandescence temperature.

Thermoluminescent materials allow to detect ionizing radiation and provide quantitative values that help us to determine the energy deposited in a given volume. The efficiency of the energy quantification is strong dependent processes such as the synthesis method.

The method proposed for the synthesis of Dysprosium doped calcium sulphate ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) is based on the precipitation of ionic solutions, adding an impurity into lattice crystal until reaching the weight percentages of Dysprosium from 0.1 to 5 %. This method turned out to be a promising technique for obtaining high-purity polycrystalline thermoluminescent materials.

For better handling and less loss of information for transportation of the powder was decided to develop pellets of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ using the teflon as a binding material with a ratio of 2:3.

Previous to dosimetric characterization, samples of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ were subjected to the following analyzing techniques: scanning electron microscopy (SEM) to obtain morphology image, X-ray diffraction (XDR) lets us know the

Abstract.

structure information, the chemical composition of the material was determined by energy spectrometry dispersive (EDS). The incorporation of the Dysprosium ion was observed by UV-Vis spectroscopy technique.

Optimal concentration of Dysprosium in to the matrix of CaSO_4 was found of 1 % after thermoluminescent signal analyzing, and this concentration was the optimal percentage that covers requirements to be applied in the ionizing radiation dosimetry.

TL glow curve of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ exposed to ^{60}Co gamma radiation and read out using a TLD-3500 reader showed two dosimetric peaks around 153 and 287 °C respectively.

TL response as a function of the absorbed dose observed a linearity in the range studied (0.5 - 30 Gy). The fading of the $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ show a loss of 3.64 % during to the first two days, from this period lost information around of 5.19 % up to 39 days.

Analyzing the results obtained during the present work can be conclude that the precipitation technique as the major method to synthesize thermoluminescent materials as like as $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ to high dosimetric irradiation characteristics application. Besides being a simple method and is not aggressive to the environment.

Pregunta Científica.

En base a la información encontrada en la literatura se tiene la siguiente pregunta científica:

¿UN MATERIAL TERMOLUMINISCENTE OBTENIDO MEDIANTE LA SINTESIS POR EL METODO DE PRECIPITACION TENDRA RESPUESTA A LA DETECCIÓN DE LA RADIACION IONIZANTE?

Hipótesis.

La hipótesis propuesta es:

Una respuesta a priori es que basados en las características termoluminiscentes de los materiales preparados por el método de precipitación pueden ser susceptibles a utilizarse en un campo de radiación ionizante.

Objetivos.

Objetivo general.

Síntesis y Caracterización Dosimétrica del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para la Detección de Radiaciones Ionizantes.

Objetivos particulares.

- ✓ Sintetizar el $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ mediante el método de precipitación.
 - ✓ Obtener las características morfológicas y estructurales.
 - ✓ Analizar las características ópticas del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
 - ✓ Estudiar las propiedades termoluminiscentes del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
-

Contenido.

Lista de Figuras.	1
Lista de Tablas.	3
Capítulo I: Introducción.	5
Capítulo II: Antecedentes.	9
Capítulo III: Marco Teórico.	11
3.1. Radiaciones.	11
3.1.1. Clasificación de la radiación.	12
3.1.2. Tipos de radiación ionizante.	13
3.1.2.1. Radiación ionizante directa.	13
3.1.2.2. Radiación ionizante indirecta.	16
3.2. Luminiscencia.	22
3.2.1. Clasificación de luminiscencia.	22
3.2.2. Tipos de luminiscencia.	23
3.2.3. Termoluminiscencia.	25
3.3. Dosimetría por termoluminiscencia.	26
3.3.1. Características de los materiales termoluminiscentes.	27
3.3.2. Ventajas de utilizar la dosimetría por termoluminiscencia.	29
3.4. Magnitudes y unidades dosimétricas.	31
3.4.1. Kerma.	31
3.4.2. Exposición.	31
3.4.3. Dosis absorbida.	32
3.4.4. Dosis Equivalente.	33
Capítulo IV: Metodología experimental.	35
4.1. Síntesis de sulfato de calcio dopado con disprosio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$).	35
4.1.1. Precursores utilizados.	35
4.1.2. Método de síntesis.	36
4.2. Caracterización morfológica, estructural y óptica.	38
4.2.1. Caracterización morfológica y estructural.	38
4.2.2. Caracterización óptica.	40
4.3. Caracterización termoluminiscente.	41

Contenido.

4.3.1. Homogeneización por lote y respuesta termoluminiscente.	43
4.3.2. Curva termoluminiscente.	43
4.3.3. Respuesta en función de la dosis absorbida (Linealidad).	44
4.3.4. Respuesta en función de la energía.	44
4.3.5. Repetibilidad.	45
4.3.6. Sensibilidad.	45
4.3.7. Desvanecimiento.	45
4.3.8. Influencia de las condiciones ambientales.	46
4.3.9. Contribución de PTFE (Teflón).	46
Capítulo V: Resultados y Análisis.	47
5.1. Método de síntesis del sulfato de calcio dopado con disprosio (CaSO ₄ :Dy).	47
5.2. Caracterización morfológica, estructural y óptica.	48
5.2.1. Caracterización morfológica y estructural.	48
5.2.2. Caracterización óptica.	50
5.3. Caracterización Dosimétrica.	52
5.3.1. Respuesta en función de la concentración del dopante (Disprosio).	52
5.3.2. Tratamiento térmico de borrado.	52
5.3.3. Homogeneización de los dosímetros.	53
5.3.4. Curva termoluminiscente.	54
5.3.5. Respuesta en función de la dosis (Linealidad).	59
5.3.6. Respuesta en función de la energía.	60
5.3.7. Repetibilidad.	62
5.3.8. Sensibilidad.	63
5.3.9. Desvanecimiento.	64
5.3.10. Influencias de las condiciones ambientales.	64
5.3.11. Contribución de PTFE (Teflón).	65
Capítulo VI: Conclusiones y Trabajo a Futuro.	67
6.1. Conclusiones.	67
6.2. Trabajo a futuro.	69
Referencias.	71
Anexo A: Productos del Trabajo de Tesis.	75

Lista de Figuras.

Figura 3.1. Clasificación de la radiación.	12
Figura 3.2. Desintegración radiactiva del radio a radón.	14
Figura 3.3. Espectro electromagnético.	17
Figura 3.4. Emisión de rayos gamma.	19
Figura 3.5. Decaimiento de un núcleo de ^{60}Co .	20
Figura 3.6. Esquema de desintegración del ^{137}Cs .	21
Figura 3.7. Clasificación y tipos de luminiscencia.	23
Figura 3.8. Modelo de bandas y emisión termoluminiscente. ● Electrón, ○ Hueco.	25
Figura 4.1. Explicación geométrica de la Ley de Bragg.	40
Figura 5.1. Micrografía de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ con 1% de concentración.	48
Figura 5.2. Difractograma de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ con 1% de concentración.	50
Figura 5.3. Espectro de emisión en polvos de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para 1 y 5% de disprosio.	51
Figura 5.4. Gráficas termoluminiscentes de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtenidas en los equipos TLD-3500 y TLD-4000.	54
Figura 5.5. Gráfica $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a una temperatura máxima de 400°C con diferente rapidez de calentamiento.	56
Figura 5.6. Gráfica $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a una temperatura máxima de 450°C con diferente rapidez de calentamiento.	57
Figura 5.7. Gráfica $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a una temperatura máxima de 500°C con diferente rapidez de calentamiento.	57
Figura 5.8. Gráfica $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a una temperatura máxima de 600°C con diferente rapidez de calentamiento.	58
Figura 5.9. Linealidad para una fuente de ^{60}Co y lector TLD-3500.	59
Figura 5.10. Gráficas de la respuesta para linealidad.	60

LISTA DE FIGURAS.

Figura 5.11. Comparación de curvas TL para diferentes fuentes de radiación.	61
Figura 5.12. Gráfica de repetibilidad de la respuesta TL del CaSO ₄ :Dy.	62
Figura 5.13. Comparación de la sensibilidad del TLD-100 y el CaSO ₄ :Dy.	63
Figura 5.14. Desvanecimiento de la Información del CaSO ₄ :Dy.	64
Figura 5.15. Respuesta TL del CaSO ₄ :Dy con y sin exposición a la luz solar.	65
Figura 5.16. Respuesta del teflón Irradiado con radiación gamma de ⁶⁰ Co.	66

Lista de Tablas.

Tabla 3.1. Clasificación de los neutrones dependiendo de su energía.	22
Tabla 4.1. Parámetros de lectura iniciales del lector TLD-3500.	44
Tabla 5.1. Análisis EDS para 1% de disprosio en CaSO ₄ :Dy.	49
Tabla 5.2. Comparación de la respuesta TL para diferentes concentraciones de Dy ³⁺ .	52
Tabla 5.3. Valores en dosis absorbida para las 25 pastillas.	53
Tabla 5.4. Distribución de las pastillas para la experimentación.	53
Tabla 5.5. Variación de parámetros de lectura del equipo TLD-3500.	55
Tabla 5.6. Parámetros de lectura del Equipo TLD-3500 sugeridos.	59
Tabla 5.7. Respuesta termoluminiscente para diferentes energías.	61
Tabla 5.8. Sensibilidad relativa del CaSO ₄ :Dy.	63

Capítulo I.

Introducción.

Una de las principales características de las radiaciones ionizantes es que son invisibles al ojo humano y se necesitan de dispositivos para poder detectar la presencia de éstas. [1]

Se han diseñado detectores para cada tipo de radiación, los cuales son capaces de medir la cantidad de dosis y el tipo de energía incidente debido a un haz de radiación, de esta manera se tienen detectores para partículas cargadas, rayos X, rayos gamma y neutrones.

Entre los detectores más conocidos están los detectores de ionización gaseosa basados en la ionización de un gas cuando son expuestos a un campo de radiación. Algunos ejemplos son la cámara de ionización, contadores proporcionales y contadores Geiger-Müller. También se tienen detectores de centelleo los cuales tienen un material luminiscente para la detección de la radiación. [1]

Otro tipo de detectores son los semiconductores entre estos se encuentran los de estado sólido, que se basan en el fenómeno de luminiscencia para su uso en la medición de la radiación. Estos materiales utilizan el fenómeno de la termoluminiscencia el cual tiene una amplia aceptación en la física de radiaciones. [1]

Los detectores termoluminiscentes (DTL) están basados en la emisión de luz del material irradiado cuando es estimulado térmicamente. Los DTL ampliamente utilizados en la determinación de la radiación ionizante son el fluoruro de litio dopado con magnesio y titanio (LiF:Mg, Ti), fluoruro de calcio dopado con manganeso (CaF₂:Mn), sulfato de calcio dopado con manganeso (CaSO₄:Mn), sulfato de calcio dopado con disprosio (CaSO₄:Dy), etc. [2]

A partir de la síntesis propuesta por Yamashita y col [3], en la literatura existe información de las características dosimétricas del CaSO₄:Dy para diferentes tipos de radiaciones [4-16]. Sin embargo son pocos los trabajos realizados que se refieren a la aplicación de otro método de síntesis de este material. [13, 16]

El interés de nuestro grupo de trabajo es el desarrollo de nuevos materiales así como la implementación de técnicas de síntesis para obtener materiales capaces de medir la radiación.

La presente tesis tiene como objetivo la propuesta de síntesis basada en el método de precipitación del CaSO₄:Dy. También se estudia la caracterización morfológica, estructural, química y dosimétrica mediante el fenómeno de la luminiscencia térmicamente estimulada y su aplicación a la detección de la radiación ionizante.

Para lograr los objetivos planteados en la presente tesis, se desarrolló el trabajo con la siguiente estructura:

En el segundo capítulo se realizó una revisión de la literatura referente a los trabajos realizados hasta el momento sobre la dosimetría de radiaciones ionizantes utilizando el CaSO₄:Dy como material luminiscente, así como el método de síntesis del material.

El marco teórico está descrito en el tercer capítulo teniendo en cuenta todos los aspectos teóricos que involucran la clasificación y tipos de radiación, la dosimetría por termoluminiscencia, las unidades y magnitudes utilizadas en el área de física médica, así como los diferentes materiales utilizados en la dosimetría.

Para el cuarto capítulo se tiene la metodología experimental, donde se describen los pasos para el desarrollo de la síntesis, la determinación de las características dosimétricas, morfológicas, estructurales y químicas.

Los resultados y la discusión referentes al método de preparación, características morfológicas y estructurales, así como la respuesta termoluminiscente del CaSO₄:Dy se detallan en el capítulo cinco.

Por último las conclusiones son presentadas en el capítulo sexto donde también se comenta el trabajo a futuro basado en las conclusiones expuestas.

Capítulo II.

Antecedentes.

Desde el descubrimiento de los rayos X en 1895 por Roentgen, se encontró una forma de detectar este tipo de radiación mediante la incidencia de los mismos sobre hojas de papel recubiertas de de platinocianuro de bario o películas fotográficas donde se observaban cambios químicos. Esta forma de detección solo demostraba la existencia de los rayos X en un determinado recinto pero no se tenía una medición exacta de los mismos. [1]

También por esas fechas se tenían las primeras mediciones termoluminiscentes mediante la irradiación con rayos catódicos de compuestos inorgánicos y minerales, realizadas por Wiedemann y Schmidt. Estos experimentos dieron origen a lo que hoy se conoce como dosimetría de estado sólido. [17]

Posteriormente se desarrollaron numerosos tipos de detectores conforme se daba el descubrimiento de nuevas fuentes de radiación. Así también se propusieron unidades y normas para la medición y reporte de la radiación. En nuestros días la evolución en el uso y manejo de la radiación dicta nuevas normas que han ido evolucionando a lo largo de los años.

En muchas áreas de investigación se dio un gran impulso gracias a la naturaleza o propósito inherente que tienen los seres humanos por la guerra, en la década de los cuarentas se lograron avances en la dosimetría de estado sólido

por parte del ejército estadounidense al producir en masa detectores de plata dopados con fosfatos. [17]

La termoluminiscencia es un fenómeno que al igual que muchos otros fenómenos naturales despertaron la curiosidad del ser humano que junto con la capacidad de razonar se terminó por vincular este fenómeno con la detección y medición de la radiación.

Muchas de las investigaciones realizadas en los siguientes años dieron como resultado la propuesta de materiales como el fluoruro de litio (LiF) por Daniels, el Sulfato de Calcio (CaSO_4) por Kossel y col y el Fluoruro de Calcio (CaF_2) por Ginther y Kirk para aplicaciones de dosimetría de radiaciones ionizantes. [17]

Estos Investigadores propusieron materiales que cumplieran con las características termoluminiscentes y también que fueran capaces de contener la radiación por periodos prolongados. Uno de estos materiales es el Sulfato de Calcio dopado con Disprosio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) propuesto por Yasmashita y col. en 1971, quienes realizaron la primera síntesis del material mediante el método de recristalización. [3]

En México los estudios termoluminiscentes del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para dosimetría se comenzó alrededor de los años ochenta por Azorín y col. [18, 19]. Estos autores propusieron los métodos de preparación del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ así como el estudio de las características termoluminiscentes para diferentes tipos de radiación, también reportan los primeros estudios cinéticos para este material. [18]

Ahora el grupo de trabajo propone utilizar el método de precipitación para sintetizar materiales termoluminiscentes de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ aplicando la ciencia y utilizando nuevas tecnologías para el desarrollo de materiales de diferentes tamaños de grano.

Capítulo III.

Marco Teórico.

Para el desarrollo del presente proyecto de tesis se consideraron, estudiaron y analizaron algunos conceptos básicos que se describen a continuación.

3.1. Radiaciones.

La radiación tiene una o más aplicaciones de acuerdo a como se descubrieron las diferentes fuentes radiactivas.

Unas de las tantas definiciones encontradas de la palabra radiación son:

Es la emisión y propagación de energía a través del espacio o en un medio material en forma de ondas electromagnéticas. [20]

Es el transporte de energía a través de corpúsculos con masa en reposo conocida. [21]

Dependiendo del manejo de la radiación se puede dar una interpretación diferente a las definiciones anteriores, la semejanza de estas definiciones es el transporte de la energía ya sea por partículas o por fotones.

3.1.1. Clasificación de la radiación.

La radiación en términos generales se clasifica como ionizante y no ionizante, figura 3.1, dependiendo de la energía transmitida por la radiación en la materia, se tiene:



Figura 3.1. Clasificación de la radiación.

La radiación no ionizante se debe a la propagación de baja energía la cual no es capaz de superar la mínima energía de ionización en los materiales, entre los que destacan la luz visible, parte de la ultravioleta, la infrarroja y radiofrecuencias.

En la figura 3.1 se muestra que se tienen dos tipos de radiación ionizante que dependen principalmente del tipo de partículas. Para la ionización directa se tienen partículas alfas, protones, electrones y positrones; mientras que en lo que se refiere a la ionización indirecta las partículas son neutrones y fotones (rayos X y gamma). [22]

En la ionización directa las partículas tienen la energía suficiente para ionizar un medio donde viajan, mediante interacciones coulombianas entre los electrones orbitales y las partículas cargadas. Mediante estas interacciones se deposita la energía en el medio.

En la ionización indirecta el depósito de la energía en el medio tiene lugar mediante los siguientes dos pasos:

1. En el primer proceso un rayo X, gamma o neutrón transfiere su energía a las partículas cargadas en el medio.
2. Para el segundo proceso la absorción de energía por el medio se da por las partículas cargadas mediante la ionización directa descrita anteriormente. [23]

Tanto la radiación directa como la indirectamente ionizante son usadas en la medicina para tratamiento de enfermedades neoplásicas mediante la radioterapia. También en el diagnóstico en las aéreas de medicina nuclear y radiología general. [22]

3.1.2. Tipos de radiación ionizante.

3.1.2.1. Radiación ionizante directa.

Los tipos principales de radiación ionizante directa son aquellas que depositan la energía mediante ionización en el medio donde colisionan.

Partículas alfa (α).

Proviene de la desintegración radiactiva de núcleos pesados (ej. uranio, radio). Estas partículas son núcleos ionizados de helio estable que consiste en dos protones y dos neutrones, la figura 3.2 muestra la desintegración radiactiva del radio a radón con una vida media de 1620 años teniendo emisión de dos partículas α . Estas partículas son monoenergéticas y su energía está en el rango de 4 a 8 MeV. [23]

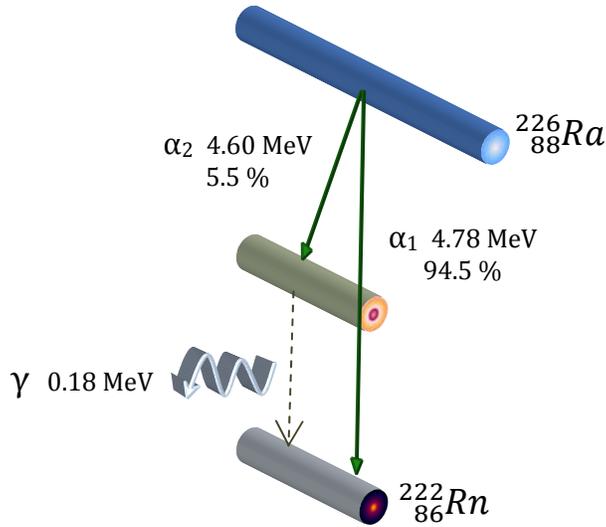


Figura 3.2. Desintegración radiactiva del Radio a Radón.

Debido a que las partículas α tiene una masa aproximada de cuatro unidades de masa atómica (uma) es una radiación que no llega a recorrer grandes profundidades en el medio, por ejemplo en el tejido humano alcanzan solamente algunos micrómetros. [24]

Electrones.

A los electrones generados a partir de la transmisión de energía por fotones mediante el efecto fotoeléctrico se les denomina fotoelectrones, a los originados por el efecto Compton se les conoce como electrones dispersados o electrones Compton. La energía de estos electrones principalmente proviene de los fotones que inciden en el medio.

A partir de la producción de electrones por equipos electrónicos (aceleradores) usados en radioterapia son conocidos como electrones acelerados por mega voltaje. Algunos de los equipos son aceleradores lineales, betatrones o microtrones. El rango de energía de los electrones alcanza los 4 a 30 MeV.

Los electrones también se producen durante el proceso de decaimiento β^- conocido como partículas beta proveniente del incremento del número atómico (Z) en una unidad manteniéndose constante el número másico (A) provocando que el neutrón se transforme en un protón y debido a la transformación se emite un electrón y un antineutrino como se representa en la ecuación 3.1. La emisión de energía se da a través de un espectro continuo hasta llegar a un límite de energía. [22]



Este tipo de radiación se utiliza en medicina para tratamiento en pacientes, principalmente mediante aceleradores lineales, la producción de estas partículas se realiza de diversas formas.

Positrones.

Son las antipartículas de los electrones conservando las mismas propiedades excepto el tipo de carga, que es negativa para los electrones y positiva para positrones. Las dos emisiones utilizadas en medicina terapéutica de este tipo de partículas son:

La emisión de positrones mediante la producción de pares o triple producción por fotones de energías elevadas. Este tipo de partículas son utilizadas en la tomografía por emisión de positrones (TEP) provenientes de núcleos de átomos en el decaimiento β^+ , este decaimiento consiste en la disminución de Z en una unidad, la transformación de un protón en un neutrón emitiendo un positrón y un neutrino, ecuación 3.2. [24]



La pérdida de energía de los positrones en el medio se realiza mediante el proceso de aniquilación de pares emitiendo dos fotones con la misma energía cada uno de 511KeV. [25]

Protones.

Partículas con carga positiva que se encuentran en el núcleo de los átomos junto con los neutrones. Son emitidos en un ciclotrón usado en radioterapia. Este tipo de partículas son emitidas mediante el bombardeo de pequeñas cantidades de hidrogeno con electrones provenientes de un filamento de tungsteno. [24]

3.1.2.2. Radiación ionizante indirecta.

En este tipo de radiaciones la absorción de la energía por el medio depende de procesos indirectos (interacciones con partículas cargadas) a la radiación incidente.

Fotones.

Un fotón se puede definir como un paquete o un quantum de energía electromagnética, con una velocidad de $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ en el vacío y que no posee masa en reposo, la energía del fotón está definida por la ecuación 3.3, donde $h = 4.135667 \times 10^{-15} \text{ eV/s}$ es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la onda electromagnética. [25]

$$E = h\nu \quad (3.3)$$

El espectro electromagnético está conformado por las ondas de radio, infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, rayos X, rayos gamma, etc. En la figura 3.3 se tiene el espectro electromagnético con las longitudes de onda y frecuencia correspondientes al tipo de onda electromagnética.

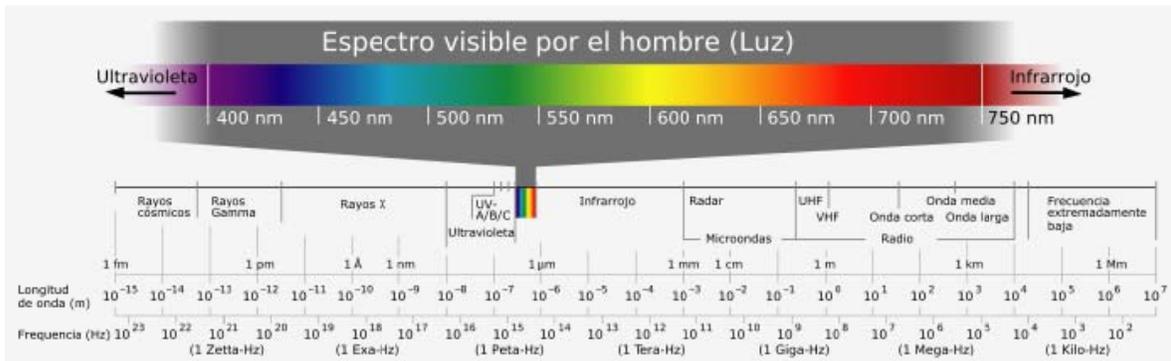


Figura 3.3. Espectro electromagnético.

Rayos X.

Se tienen dos tipos de rayos X, los característicos y bremsstrahlung, este tipo de radiación tiene importancia en radiodiagnóstico y radioterapia. Los rayos X característicos provienen de transiciones electrónicas entre los electrones orbitales en los átomos. La radiación bremsstrahlung se obtiene mediante la interacción coulombiana entre un electrón incidente y el núcleo del átomo. [22]

Estos dos tipos de rayos X se producen en un tubo de rayos X donde se tiene un ánodo y un cátodo, en el cátodo se tiene un filamento de tungsteno que al ser calentado por una corriente eléctrica produce un flujo de electrones en la superficie del filamento, el ánodo o blanco tiene carga positiva para atraer el flujo de electrones y al colisionar se emiten rayos X en todas direcciones. De todos los electrones que colisionan en el ánodo solo se tiene emisión del 1% de rayos x. [24]

La energía de los rayos X característicos depende de que material compone el ánodo, se usan preferentemente materiales de elevado peso atómico (ej. tungsteno). El rango de energías de los rayos X es de 1 keV hasta 1 MeV. [16]

Rayos gamma (γ).

La producción de rayos gamma se da por decaimiento en un núcleo excitado, cuando se tiene desexcitación en el núcleo se produce un fotón de rayos gamma. La emisión de rayos gamma por parte del radionúclido se determina a partir de los niveles energéticos en el radionúclido, que van desde bajas energías alrededor de 100 keV hasta energías del rango de 3 MeV. [22]

La emisión gamma de un núcleo excitado se tiene en la ecuación 3.4, donde ${}^A_ZX^*$ representa al núcleo excitado, A_ZX el estado fundamental del núcleo.



La energía del rayo gamma emitido se obtiene mediante la ecuación 3.5, a partir de la resta de la energía del estado excitado menos la energía de un estado de menor energía o si la transición se da hasta el estado fundamental con energía $E=0$. [16]

$$E_{\gamma 1} = E_i - E_f ; E_{\gamma 2} = E_i \quad (3.5)$$

El esquema general de la emisión de rayos gamma se observa en la figura 3.4, se tiene presentes los estados de energía en el núcleo del átomo.

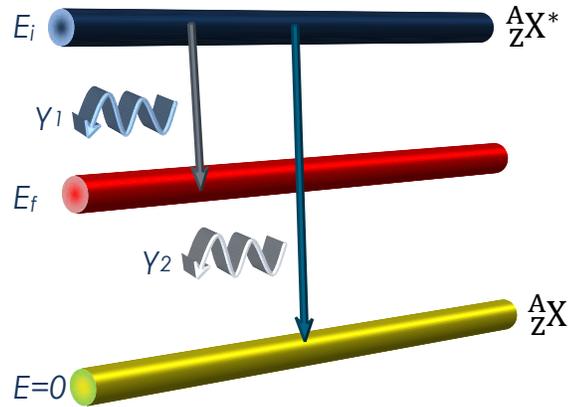


Figura 3.4. Emisión de rayos gamma.

Existen varios tipos de radionúclidos que emiten radiación gamma mediante el proceso antes mencionado, los rayos gamma utilizados para el desarrollo del presente trabajo son gammas de ^{60}Co y de ^{137}Cs , el mecanismo de emisión gamma en estos elementos se describe a continuación.

Rayos gamma de ^{60}Co .

Las transiciones energéticas del núcleo excitado del ^{60}Co son las responsables de la emisión de radiación gamma al decaer a estados fundamentales, con lo que se tiene un núcleo estable de ^{60}Ni . [1]

En la figura 3.5 se representan estos estados excitados con sus respectivas energías y rayos gamma que emiten cuando pasan a estados más estables.

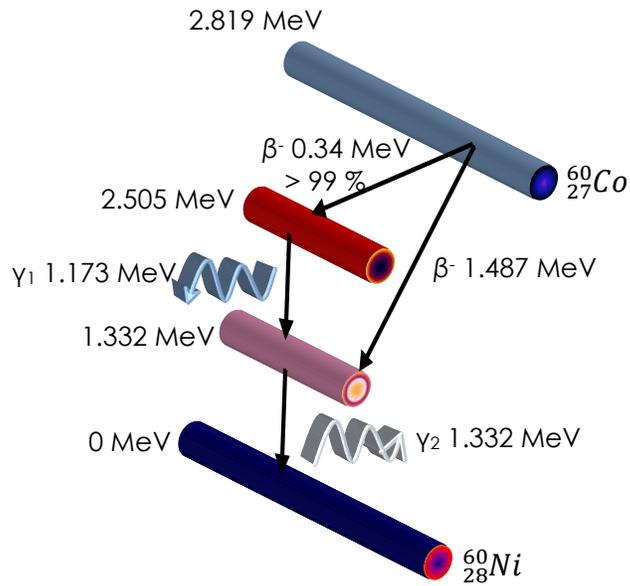


Figura 3.5. Decaimiento de un núcleo de ^{60}Co .

Las energías de los dos rayos gamma que se emiten en cascada provenientes del decaimiento son de 1.173 y 1.332 MeV y dependiendo de la vida media (el tiempo necesario para que cualquier radioisótopo decaiga a la mitad de su actividad original $T_{1/2}$), 5.27 años, será emitido cualquiera de los dos fotones gamma.

Rayos gamma de ^{137}Cs .

Los fotones provenientes de una fuente de ^{137}Cs se producen a partir de un estado metaestable del ^{137}Ba con periodo de 2.55 min, este estado metaestable tiene una energía de 0.665 MeV por tanto los rayos gamma emitidos tienen la misma energía de decaimiento al estado fundamental del ^{137}Ba . [16]

La figura 3.6 muestra un esquema de desintegración para el ^{137}Cs donde se observa la emisión de los rayos gamma en un 89.9 % y también la emisión de partículas beta.

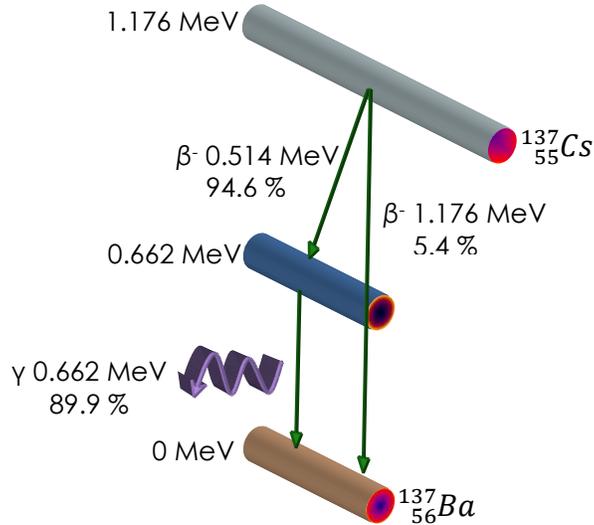


Figura 3.6. Esquema de desintegración del ^{137}Cs .

Neutrones.

Debido a que los neutrones no tienen carga eléctrica al interactuar con las partículas cargadas no tienen efecto en ellos, solamente tienen efecto con los núcleos de los átomos mediante reacciones nucleares.

Como las fuerzas nucleares tienen muy corto alcance, la capacidad de penetración de los neutrones es alta en un determinado medio. Por ejemplo, para neutrones con una energía de 2 MeV el recorrido es de 3.2 cm. [16]

La producción de neutrones se da mediante reacciones nucleares a diferencia de los otros tipos de radiaciones generados mediante fuentes radiactivas, las formas de obtener neutrones son las siguientes:

- Fuentes a partir de la reacción (α, n) ,
- Fuentes a partir de la reacción (γ, n) ,
- Fisión espontánea,
- Reacciones nucleares en aceleradores de partículas,
- Fusión.

Según la energía de los neutrones, estos se clasifican en lentos, intermedios y rápidos, como se observa en la tabla 3.1. [16]

Clasificación de los Neutrones	Energía
Neutrones lentos	$E_n < 1 \text{ eV}$
Neutrones intermedios	$1 \text{ eV} < E_n < 0.5 \text{ MeV}$
Neutrones rápidos	$0.5 \text{ MeV} < E_n$

Tabla 3.1. Clasificación de los neutrones dependiendo de su energía. [16]

3.2. Luminiscencia.

El fenómeno de luminiscencia se describe mediante la emisión de luz por una material orgánico o inorgánico.

Esta emisión de luz se da por la excitación y desexcitación de un electrón en el átomo, es decir el electrón pasa a un nivel de energía mayor al que le correspondía por efecto de la energía absorbida, cuando este regresa a su estado fundamental se produce la emisión de luz. [26]

3.2.1. Clasificación de luminiscencia.

La luminiscencia depende del tiempo (τ) que tarda el material en emitir un fotón de luz después del periodo de excitación, a partir de este tiempo de emisión se clasifica la luminiscencia como fluorescencia o fosforescencia.

La fluorescencia se define para tiempos menores a 10^{-8} s y da la emisión de luz con una longitud de onda mayor que la longitud de onda absorbida debido a dispersión del material.

En la fosforescencia la emisión de luz se tiene en tiempos mayores a 10^{-8} s, la diferencia con la fluorescencia radica en que existen estados metaestables entre los niveles de energía y los electrones son atrapados en estos estados, retrasando la emisión de luz por el material. [27]

3.2.2. Tipos de luminiscencia.

A partir de la clasificación de luminiscencia y del tipo de des-excitación electrónica se pueden definir diferentes tipos de luminiscencia. Esta luminiscencia se conoce como luminiscencia estimulada. En la figura 3.7 se tiene los tipos y clasificación de luminiscencia.

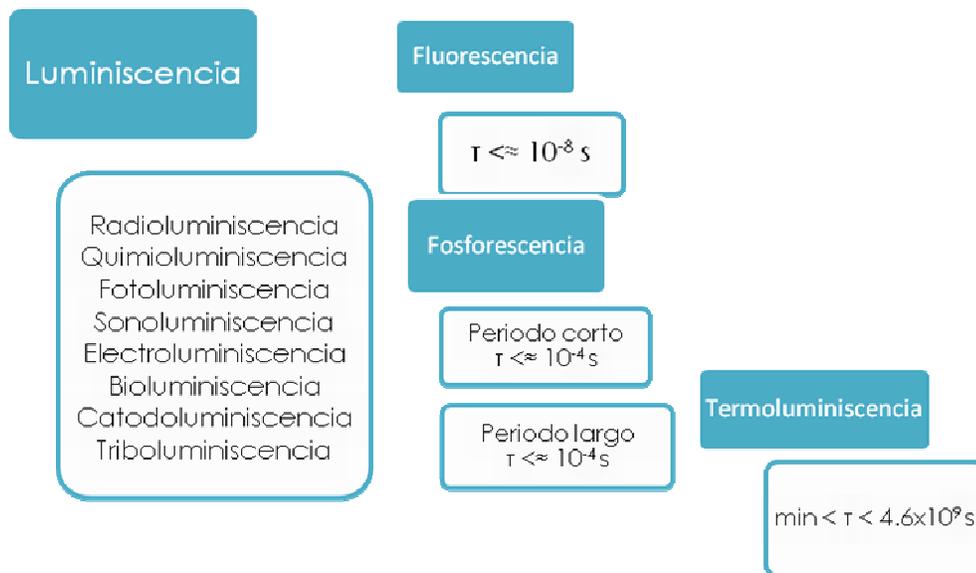


Figura 3.7. Clasificación y tipos de luminiscencia.

Radioluminiscencia.

La excitación de los electrones en este tipo de luminiscencia como su nombre lo indica es a partir de radiaciones provenientes de materiales radiactivos.

Quimioluminiscencia.

En las reacciones químicas la forma más común de liberar la energía es en forma de calor, existen reacciones o síntesis que también liberan la energía en forma de fotones de luz, por ejemplo el luminol, producto químico que tiene efecto en muchas reacciones de luminiscencia. [28]

Bioluminiscencia.

La luz emitida proviene de reacciones químicas que son de origen biológico, por ejemplo en algunos organismo vivos presentan luminiscencia ya sea para atraer a sus presas o como la luciérnaga que emite luz en su bulbo. [28]

Fotoluminiscencia.

La excitación de los electrones se realiza mediante haces de luz visible o ultravioleta. Por ejemplo en equipos como espectrofluorímetros.

Sonoluminiscencia.

La interacción de las ondas de sonido a frecuencias elevadas con los electrones en los átomos permite la emisión de luz en soluciones químicas. [28]

Electroluminiscencia.

Es la luminiscencia en materiales cuando se les aplica un campo eléctrico, una corriente o un voltaje.

Catodoluminiscencia.

La emisión de electrones mediante la aceleración de los mismos por tubos catódicos nos permiten ver la emisión de luz en aparatos de televisión que son los más conocidos, existen equipos de emisión de electrones para la investigación de luminiscencia de materiales. [26]

Triboluminiscencia.

En este tipo de luminiscencia la emisión de luz se realiza mediante la fuerza de fricción ejercida en los materiales. El tipo de luminiscencia se debe a la impartición de la energía debido a un proceso mecánico.

3.2.3. Termoluminiscencia.

La emisión de luz térmicamente estimulada es la emisión de luz en un material previamente irradiado al calentarlo por debajo de su temperatura de incandescencia.

Para explicar este fenómeno de termoluminiscencia se utiliza el modelo de bandas de energía de un semiconductor.

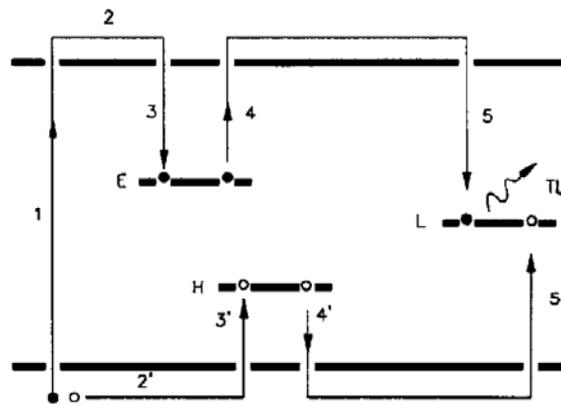


Figura 3.8. Modelo de bandas y emisión termoluminiscente. ● electrón, ○ hueco. [16]

La recombinación de los electrones y huecos generados mediante la incidencia de radiación ionizante en un material termoluminiscente se observa en la figura 3.8., este proceso se describe a continuación:

Cuando la radiación incide en el material los electrones excitados pasan (1) de la banda de valencia a la de conducción donde se desplazan (2) hasta ser atrapados en los defectos o trampas (3) (intersticiales, vacancias, etc.) o por impurezas en el materia. La contraparte del electrón (hueco) se desplaza por el cristal (2') hasta ser atrapado por trampas para huecos ubicadas en niveles cercanos a la banda de valencia (3').

Los electrones atrapados en un material termoluminiscente pueden ser retenidos por períodos prolongados hasta que la aplicación de una energía externa conocida como estimulación térmica libera a los electrones (4) y los huecos (4') de las trampas. Tanto los electrones como los huecos se desplazan por su banda correspondiente y tras ocurrir una recombinación (5 y 5') se produce la emisión de un fotón con longitud de onda ubicada en el espectro visible. [16]

3.3. Dosimetría por termoluminiscencia.

La dosimetría tiene como fin medir la dosis absorbida en un material sometido a radiación ionizante. Dependiendo de la forma de obtener la respuesta en dosis absorbida en el material se define el tipo de dosimetría aplicada, algunos ejemplo son dosimetría con cámaras de ionización, dosimetría con películas, etc.

Un dosímetro se puede definir como cualquier dispositivo, con un volumen determinado sensible a la radiación ionizante, capaz de proporcionar una lectura de la dosis absorbida. [27]

3.3.1. Características de los materiales termoluminiscentes.

Los materiales utilizados en dosimetría termoluminiscente deben cumplir con algunas características para ser candidatos como dosímetros de la radiación ionizante: sensibilidad a la radiación ionizante, la capacidad de almacenar la información por periodos largos de tiempo, una curva termoluminiscente con un pico entre el rango de 100 y 300 °C que presente una respuesta lineal en función de la dosis absorbida, respuesta estable en función de las condiciones ambientales, etc.

Fluoruro de Litio dopado con Magnesio y titanio ($\text{LiF}:\text{Mg}$, $\text{LiF}:\text{Ti}$)

Este material es de uso comercial conocido como TLD-100 es equivalente al tejido humano el cual es considerado como uno de los mejores materiales de referencia en dosimetría. [2]

La curva termoluminiscente que presenta contiene 6 picos debido a la compleja dinámica de las trampas. Para fines prácticos los picos utilizados son desde el cuarto al quinto para las diferentes aplicaciones dosimétricas ya que son lo suficientemente estables. Tiene una linealidad a una energía máxima de 1 kGy. [30]

El desvanecimiento que presenta varía en un rango aproximado de 5 a 10 % por año a temperatura ambiente.

Fluoruro de Calcio dopado con Disprosio ($\text{CaF}_2:\text{Dy}$).

Este detector se puede encontrar comercialmente como TLD-200, se caracteriza por tener alta sensibilidad a la radiación gamma, 30 veces más comparado con el TLD-100. La curva termoluminiscente tiene un desvanecimiento

rápido aproximadamente 10 % por mes, presenta linealidad hasta 6 Gy, en este detector se tiene una dependencia de la energía por debajo de los 250 keV. [31]

Fluoruros de Calcio dopado con Manganeso ($\text{CaF}_2:\text{Mn}$).

Las propiedades de estos detectores son mejores comparadas con la del TLD-100. Presenta un desvanecimiento de un 10 % en algunas horas o hasta un 1 % por día.

La sensibilidad observada es de 3 a 5 veces a la del TLD-100. La respuesta lineal se tiene hasta unos 2 kGy y con una saturación a 10 kGy. [29]

Sulfato de Bario (BaSO_4).

El detector dopado con europio tiene un pico dominante en la curva termoluminiscente a una temperatura de 200 °C, muestra buena linealidad y un bajo desvanecimiento para cascadas de muy altas energías electromagnéticas. Okamoto y col (1986). [31]

Para radiación gamma presenta un pico a una temperatura de 266 °C, la respuesta lineal está en el rango de 4 mGy a 50 Gy, tiene una sensibilidad 4 veces mayor comparado con $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. [31]

Oxido de Aluminio (Al_2O_3).

Este tipo de material es utilizado principalmente para dosimetría termoluminiscente y mediciones de medio ambiente. Presenta una curva termoluminiscente con cuatro picos reportados por Daniel's. [29]

Oxido de Berilio (BeO).

Este material es dependiente de los productos utilizados en la síntesis, Scarpa y Tochilin y col muestran una curva termoluminiscente de dos picos a 180 y 220 °C, el segundo pico aparece en dosis altas y es intenso arriba de 10 Gy.

Presenta una linealidad por arriba de 0.5 Gy, tiene un valor equivalente al tejido de 7.13, es de 2 a 3 veces más sensible que el LiF para neutrones rápidos y para neutrones térmicos es menos sensible. [29]

Sulfato de Calcio dopado con Disprosio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$).

En este material la intensidad de los picos depende principalmente de la pureza en los químicos utilizados, el método de síntesis realizado, la cantidad de impurezas, el aglutinante utilizado para las pastillas en el material y el tamaño de grano. [31]

La energía necesaria para poder ionizar el $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, es decir la energía de la banda prohibida (E_g) es de 9.5 eV. [32]

Este material es muy sensible por lo que es útil para monitoreo ambiental o de área, pero no es utilizado en las aplicaciones médicas. Para realizar dosimetría clínica utilizando este material es necesario realizar correcciones por la dependencia energética del material. [31]

3.3.2. Ventajas de utilizar la dosimetría por termoluminiscencia.

En la dosimetría se tienen varias formas de medir o cuantificar la radiación ionizante, a continuación se presentan algunos tipos de dosimetría basados en materiales sensibles a la radiación ionizante:

- Por cámaras de ionización,
- Mediante películas,
- Calorimetría,
- Dosimetría química,
- Dosimetría por gel,
- Por termoluminiscencia.

Dependiendo del tipo de dosimetría utilizado se consideraran las ventajas del mismo para obtener resultados confiables y precisos en cada una de las mediciones realizadas.

La dosimetría termoluminiscente tiene múltiples ventajas para la dosimetría en Física Médica y se aplica en muchos hospitales del país, debido a sus características las cuales se mencionan a continuación:

1. Tamaño pequeño de los dosímetros, ya sea que se usen en dosimetría personal o de pacientes. El almacenamiento no implica grandes espacios.
2. Un mismo dosímetro se puede utilizar varias veces y el tiempo de uso sólo depende del daño permanente por radiación, calor y por factores en el medio ambiente.
3. Factores económicos derivados del uso del mismo dosímetro, ya que se puede usar varias veces, esto permite ahorros tanto en las áreas de investigación como en hospitales.
4. Como la lectura se realiza de forma pasiva no se necesita de ningún componente externo en el dosímetro para obtener una medición de la radiación.

3.4. Magnitudes y unidades dosimétricas.

Para la dosimetría de radiación ionizante, es necesario tener unidades específicas y magnitudes que estén relacionadas con las mediciones, con la irradiación de los dosímetros y los tipos de fuentes radiactivas y con los equipos utilizados para la medición de la dosis absorbida en el dosímetro termoluminiscente.

Algunas de las magnitudes junto con sus unidades se abordan a continuación:

3.4.1. Kerma.

La magnitud kerma (energía cinética liberada en el medio) es la relación $dE_{T,R}$ entre dm , ecuación 3.6.

$$K = \frac{dE_{T,R}}{dm} \quad (3.6)$$

Donde $dE_{T,R}$ es la suma de todas las energías cinéticas iniciales de las partículas ionizadas cargadas liberadas por partículas ionizantes sin carga en un material de masa dm . [21]

3.4.2. Exposición.

La exposición (X) es el cociente de la carga absoluta (dQ); es decir, a partir de la carga total de los iones de un signo producidos cuando todos los electrones liberados por fotones son frenados completamente; entre una masa de aire dm , y es descrita por la ecuación 3.7.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (3.7)$$

La unidad de exposición en el Sistema Internacional (SI) es coulomb por kilogramo (C/Kg). Anteriormente era el roentgen (R) debido a que, en 1 cm³ de aire (1.293 mg) en condiciones de presión y temperatura normales, los iones producidos por los electrones secundarios, transportan una unidad electrostática de carga de cada signo. Las unidades especiales del roentgen se muestran en la ecuación 3.8 basada en la equivalencia anterior. Esta unidad solo se aplica a radiaciones gamma y rayos x en aire. [16]

$$1R = \frac{1 \text{ ues}}{1.293 \text{ mg aire}} * \frac{1 \text{ Coulomb}}{2.996 \cdot 10^{-9} \text{ ues}} * \frac{1 \text{ g}}{10^{-3} \text{ Kg}} = 2.58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{Kg}} \quad (3.8)$$

3.4.3. Dosis absorbida.

Este término es uno de los más importantes en el campo de la dosimetría por termoluminiscencia, se define mediante la cantidad de radiación absorbida en un volumen dado, o en una definición más formal es la cantidad de energía absorbida por unidad de masa en cualquier material y se representa mediante la ecuación 3.9. [31]

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (3.9)$$

Donde $d\varepsilon$ es la energía impartida por radiación ionizante en un volumen de masa dm , las unidades de dosis absorbida son energía/masa por tanto las unidades son joule/kilogramo (J/Kg), y se conoce como Gray (Gy).

En algunos hospitales, como el cambio de unidad al SI se dio recientemente, todavía se utilizan las unidades antiguas que son erg/g cuyo nombre es rad. La conversión de rad a gray se da en la ecuación 3.10.

$$1\text{rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}}; 1\text{Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}; 1\text{Gy} = 100\text{rad} \quad (3.10)$$

3.4.4. Dosis Equivalente.

La dosis absorbida no es suficiente para determinar el daño biológico. Por lo tanto la relación del daño biológico y la dosis absorbida se realiza mediante un factor de ponderación que multiplicado por la dosis absorbida se obtiene la dosis equivalente, este término se define mediante la ecuación 3.11.

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (3.11)$$

Donde w_R es el factor de ponderación para el tipo de radiación R, $D_{T,R}$ es la dosis suministrada por la radiación R sobre el órgano o tejido. Las unidades para esta magnitud son el sievert (Sv), pero al igual que la dosis absorbida se maneja otra unidad conocida como rem que la dosis equivalente cuando se usan las unidades en rad. La equivalencia de sievert a rem se observa en la ecuación 3.12.

$$1\text{Sv} = 100\text{rem} \quad (3.12)$$

Capítulo IV.

Metodología Experimental.

La síntesis y estudio morfológico de materiales es uno de los fundamentos más importantes en la actualidad, derivando nuevas tecnologías desarrolladas a partir del estudio de materiales. En el área de física de radiaciones es necesario el desarrollo y estudio constante de materiales que permitan generar nuevos detectores ya sea encontrando nuevos materiales que tengan respuesta ante cualquier tipo de radiación o modificando los existentes.

4.1. Síntesis de sulfato de calcio dopado con disprosio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$).

4.1.1 Precursores utilizados.

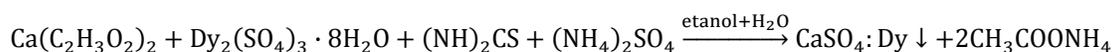
Los materiales que se utilizaron para realizar la síntesis del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ fueron los siguientes:

- Acetato de Calcio Hidratado al 99 % [$\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$], Sigma Aldrich,
- Sulfato de Disprosio Octahidratado al 99.99 % [$\text{Dy}_2(\text{SO}_4)_3$], Aldrich Chem.
- Tiourea al 99 % [$(\text{NH}_2)_2\text{CS}$], J. T. Baker,
- Sulfato de Amonio al 99.7 % [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$], Técnica Química,
- Alcohol Etílico (Etanol) y

- Agua bidestilada.

4.1.2. Método de síntesis.

La síntesis se realizó mediante el método de precipitación, obteniendo soluciones iónicas de cada uno de los reactivos utilizados en un ambiente etanol-agua, la siguiente ecuación química describe el proceso de la síntesis:



La síntesis se lleva a cabo siguiendo el siguiente procedimiento:

A una solución de 20 ml de agua bidestilada (10 ml) y etanol (10 ml) se agregaron 3g de Acetato de Calcio. Para diluir el acetato, se le fue agregando solución agua-etanol hasta que el polvo de acetato de calcio quedara completamente diluido en la solución.

Para la disolución de 4.5g de Tiourea se le agregó poco a poco una solución de 35 ml de agua bidestilada (15 ml) y etanol (20 ml) hasta que se disolviera por completo.

Se disolvieron 0.0177g de Sulfato de Disprosio (para una concentración de 1 % de Disprosio) en 6 ml de agua bidestilada con agitación constante para que se disolviera completamente.

Por otro lado, a una solución de 1.8 g de sulfato de amonio en 6 ml de agua bidestilada, se le agregaron 5 ml de etanol observándose una ligera precipitación. Se requirió agitación constante para diluir el precipitado, agregando solución agua-etanol hasta diluir por completo.

En la solución de acetato de calcio se colocó un agitador magnético para mantener una agitación constante, agregando primero la solución de tiourea

gota a gota, seguida de la solución de sulfato de disprosio también gota a gota, observándose una precipitación moderada la cual se mantenía con la agitación hasta desaparecer al poco tiempo. Por último se agregó la solución de sulfato de amonio gota a gota para que la reacción se produjera lentamente y se obtuviera el Sulfato de Calcio dopado con Disprosio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$). Conforme se le agregaba la solución de Sulfato de Amonio se observaba un precipitado blanco que se formaba en la solución con agitación constante.

Una vez que la reacción concluyó la solución bajo agitación constante se filtró y se enjuagó con agua bidestilada por 10 veces para eliminar los residuos de la reacción.

Para observar la influencia del dopante en la respuesta termoluminiscente se realizaron síntesis con concentraciones de 0.1, 1 y 5 % de disprosio respecto al calcio. De los resultados obtenidos se optó por trabajar con la muestra de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dopada al 1 % por presentar mejores características para la dosimetría de estado sólido como se observa en los resultados.

El polvo de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ resultante se colocó en una estufa a 90 °C por 2 horas para secar por completo el material. Por último se le dio un tratamiento térmico a 900 °C por una hora para cristalizar y eliminar residuos presentes de carbono en el polvo final de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

Debido a que el manejo de polvos se dificultó cuando se querían leer masas semejantes de muestras ya irradiadas y comparar resultados, estos variaban considerablemente en los experimentos. Por tal motivo se optó por elaborar pastillas del material ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) mezclado con teflón (PTFE) en polvo y así tener una masa homogénea. Para esto, se mezcló en un crisol el teflón (PTFE) con el Sulfato de Calcio en una proporción de 3:2, después paulatinamente se fue agregando nitrógeno líquido, para que el teflón se mezclara

homogéneamente con el material sintetizado. Se realizó un proceso de sinterizado para mejorar la dureza y resistencia de las mismas.

Se obtuvieron alrededor de 120 pastillas con dos diámetros diferentes uno de 4 y otro de 5 mm con un espesor de 1 mm aproximadamente, por último se les dio un tratamiento térmico con diferentes rampas de calentamiento hasta alcanzar la temperatura de 400 °C donde se mantuvo por una hora.

4.2. Caracterización morfológica, estructural y óptica.

Uno de los factores que se debe tener en consideración después de sintetizar materiales es conocer las propiedades estructurales y físicas de los mismos como por ejemplo el tamaño de partícula que se obtiene en la síntesis, la estructura cristalina, los compuestos que conforman al material obtenido, la orientación espacial de los átomos; ya que dependiendo de la aplicación se puede modificar esta estructura.

4.2.1. Caracterización morfológica y estructural.

Microscopia Electrónica de Barrido.

La utilización del microscopio electrónico de barrido (MEB), nos proporciona imágenes del material; así composición química mediante la espectrometría de energía dispersa (EDS), etc... Dependiendo de los accesorios que se encuentren instalados en el microscopio se pueden obtener otras aplicaciones.

El funcionamiento básico del microscopio es a través de un haz de electrones que barren la muestra a estudiar mediante el uso de lentes electromagnéticas, cuando los electrones chocan con el material se generan

principalmente electrones secundarios, rayos X y electrones retrodispersados; para generar las imágenes se necesitan detectores de electrones secundarios, en el caso de la composición química se realiza a base de la detección de los rayos X característicos de cada material, dependiendo de la cantidad de emisión de los mismos por parte del material estudiado se estima el porcentaje de composición en el material. [33]

Antes de introducir la muestra de CaSO₄:Dy en el microscopio se le aplicó una capa de oro para mejorar la conductividad eléctrica del material.

Las micrografía de CaSO₄:Dy y la composición química (EDS) se obtuvieron en un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo LV6300 con detector de rayos X Oxford ubicado en CICATA Legaríá -IPN.

Difracción de Rayos X.

La estructura cristalina de un material se puede conocer mediante la difracción de rayos x en los planos de la red cristalina del material. Dependiendo del ángulo de reflexión se calcula la distancia interplanar mediante la ley de Bragg (ecuación 4.1), la cual establece la relación entre la longitud de onda del rayo X incidente, el ángulo de difracción y los espacios interplanares como se observa en la figura 4.1. [34]

$$n\lambda = 2d_{hkl}\text{Sen } \theta_{hkl} \quad (4.1)$$

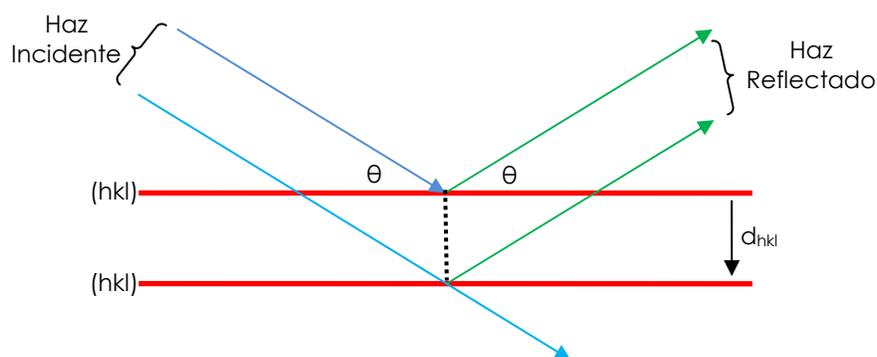


Figura 4.1. Explicación geométrica de la ley de Bragg.

A partir de la intensidad de reflexión en un difractograma se puede estimar el tamaño de grano mediante la aplicación de la fórmula de Sherrer's mostrada en la ecuación 4.2, donde D es el tamaño de grano, λ es la longitud de onda de los rayos x incidentes, θ es el ángulo de Bragg y β (en radianes) es la diferencia de las intensidades en la mitad del pico más intenso del difractograma. [12]

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.2)$$

La difracción de rayos X se realizó a temperatura ambiente en un equipo Siemens D-5000 con longitud de onda de 1.5045 \AA correspondiente a un blanco de Cobre ($\text{Cu-K}\alpha$) a 40Kv y 30mA. La concentración de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ con 1% de dopante se utilizó para la difracción de rayos X .

4.2.2. Caracterización óptica.

La interpretación general de espectroscopia óptica se le atribuye a la interacción de fotones ópticos con la materia, derivándose lo que conocemos como absorción y emisión óptica del material. Los equipos para espectroscopia óptica están basados en el manejo y medición de la luz a través de un monocromador y de filtros ópticos. [35]

La espectroscopia óptica de los polvos de CaSO₄:Dy para diferentes concentraciones de dopante se realizó en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM-I) en un equipo Perkin Elmer LS 5 espectrofotómetro fluorescente, se obtuvieron espectros de absorción y emisión del CaSO₄:Dy con el objetivo principal de detectar la presencia del dopante mediante la emisión de las longitudes de onda características del disprosio.

4.3. Caracterización termoluminiscente.

Para realizar las pruebas de termoluminiscencia primero se irradiaron los polvos de CaSO₄:Dy con radiación gamma de una fuente de ⁶⁰Co a una dosis absorbida de 1Gy a una rapidez de dosis de 64.09 cGy/min, la respuesta termoluminiscente se comparó en proporción al dopante (0.1, 1 y 5 % de disprosio) incorporado en el material.

Las primeras lecturas se realizaron en un equipo Harshaw TL modelo 4000 ubicado en la UAM-I, conectado a una PC para guardar y analizar los datos obtenidos experimentalmente.

Una vez seleccionado el porcentaje de concentración del Disprosio óptimo en el CaSO₄:Dy (por tener una mejor respuesta termoluminiscente, en este caso 1%) se comenzó con la caracterización dosimétrica para radiaciones ionizantes cubriendo las siguientes propiedades.

- Homogeneización del lote y respuesta termoluminiscente,
- Curva termoluminiscente,
- Respuesta en función de la dosis absorbida,
- Respuesta en función de la energía,
- Repetibilidad,
- Sensibilidad,
- Desvanecimiento,

- Influencia de las condiciones ambientales,
- Contribución del PTFE.

En los primeros experimentos se trabajó con el polvo de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para cada concentración, se tuvieron dificultades en la irradiación y lectura de los mismos; en la irradiación en la fuente de ^{60}Co las muestras sujetas a irradiación se les colocó una placa de acrílico de 0.5 cm de espesor con la intención de obtener la máxima dosis absorbida en las muestras, evitando factores de dispersión y build up.

En el caso de la lectura se tienen que recurrir a pequeños contenedores de aluminio para colocar el polvo de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ irradiado en la plancheta de calentamiento del lector Harshaw TL 4000; el polvo colocado en los contenedores de aluminio es pesado previamente con el propósito de tener la misma cantidad de polvo en cada lectura y no se modifique la respuesta termoluminiscente ya que con el continuo manejo de las muestras se tienen pérdidas de material ya sea por la transportación o por el manejo en el laboratorio.

Para compensar estas dificultades se procedió a elaborar pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ utilizando como material aglutinante el teflón (PTFE) en polvo en una proporción de 2:3. Para realizar un mezclado homogéneo se bajó la temperatura mediante la adición de nitrógeno líquido. Para llevar a cabo el proceso de sinterizado las pastillas se colocaron en una mufla a temperatura ambiente y después se aplicó una rampa de calentamiento hasta llegar a 400 °C manteniendo la temperatura por una hora.

4.3.1. Homogeneización por lote y respuesta termoluminiscente.

Las matrices que se utilizaron para elaborar las pastillas de CaSO₄:Dy y teflón tienen un diámetro de 4 y 5 mm. El espesor de las pastillas depende principalmente de la presión aplicada en las matrices teniendo diferencias mínimas en el espesor de las pastillas; considerando el diámetro de las pastillas se separaron, dos lotes y se expusieron a radiación gamma de ⁶⁰Co a una dosis adsorbida de 2Gy con una rapidez de dosis de 64.09 cGy/min. Las irradiaciones se llevaron a cabo en el Hospital Juárez de México.

Las lecturas de las pastillas previamente irradiadas fueron obtenidas en un lector Harshaw TLD-3500 con parámetros de lectura descritos en la tabla 4.1, instalado en la UAM-I. Se decidió trabajar con el diámetro de pastilla de 4 mm, teniendo un lote con 68 pastillas de las cuales se escogieron 16 pastillas que presentaron respuesta termoluminiscente semejante y se dividieron en cuatro lotes. Estos lotes se utilizaron en todos los experimentos posteriores.

4.3.2. Curva termoluminiscente.

Para obtener esta característica se irradiaron las pastillas de CaSO₄:Dy y PTFE con rayos gamma de ⁶⁰Co a una dosis adsorbida de 1Gy y poder seleccionar los parámetros de trabajo del equipo lector, descritos en la tabla 4.1.

Las lecturas se llevaron a cabo en el lector TLD-3500, se observó que los cambios de los parámetros de trabajo del equipo influyen directamente en la curva termoluminiscente y la respuesta en dosis absorbida de los dosímetros de CaSO₄:Dy.

Parámetros de lectura TLD-3500	
Rapidez de calentamiento	2 °C/s
Temperatura de precalentamiento	50 °C
Tiempo de precalentamiento	25 s
Temperatura máxima calentamiento	350 °C
Tiempo de adquisición	125 s

Tabla 4.1. Parámetros de lectura iniciales del lector TLD-3500.

4.3.3. Respuesta en función de la dosis absorbida (Linealidad).

Para obtener la linealidad se irradiaron los lotes de pastillas a diferentes dosis que van desde 0.5 hasta 30 Gy, posteriormente estos lotes fueron leídos en un equipo Harshaw TLD 3500.

4.3.4. Respuesta en función de la energía.

Para verificar esta característica, se utilizaron diferentes fuentes de radiación. Debido a que cada equipo emite radiación con diferente energía. Los materiales termoluminiscentes (TL) fueron expuestos a diferentes energías para observar el comportamiento a diferentes energías.

Las fuentes utilizadas para la irradiación de los dosímetros son la fuente de ^{60}Co con una haz de 1.33 y 1.17 MeV de energía, una fuente ^{90}Sr de partículas beta con una energía de 546 keV y también una fuente ^{137}Cs con una energía de 662 keV, las últimas dos fuentes de radiación se encuentran ubicadas en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa (UAM-I).

Después de la exposición a las diversas fuentes, las lecturas se realizaron en el equipo Harshaw TLD-3500, que posteriormente se guardaron y graficaron en la

base de datos para comparar las respuestas dependiendo de las energías utilizadas en la irradiación.

4.3.5. Repetibilidad.

Para analizar esta característica termoluminiscente se realizaron diez ciclos (irradiación, lectura y borrado) bajo las mismas condiciones en cada uno de los ciclos para todas las pastillas de CaSO₄:Dy. La irradiación se llevó a cabo utilizando una fuente de ⁶⁰Co a una dosis de 2Gy; las lecturas se obtuvieron en el equipo Harshaw TLD-3500 utilizando ambiente de nitrógeno, el tratamiento de borrado se hizo en una mufla Thermo scientific por media hora a una temperatura de 300 °C.

4.3.6. Sensibilidad.

La respuesta obtenida en la irradiación de las pastillas a 2Gy en ⁶⁰Co se comparó con los dosímetros de referencia TLD-100 (LiF:Mg, Ti) extensamente utilizados en dosimetría, irradiados a la misma dosis y utilizando el lector TLD-3500 con los mismos parámetros de lectura.

4.3.7. Desvanecimiento.

El desvanecimiento se tiene cuando los dosímetros irradiados son almacenados por períodos de tiempo definidos, con la finalidad de observar que tanta pérdida de información se tiene en los dosímetros.

Esta característica es representativa en la caracterización dosimétrica al realizarse las lecturas en la dosimetría termoluminiscente por períodos mayores a un mes desde que se comienza a utilizar el dosímetro.

Las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ se irradiaron con rayos gamma de ^{60}Co a una dosis de 2 Gy a temperatura ambiente; el almacenamiento se realizó en condiciones ambientales normales durante tiempos que van desde 2 días hasta 39 días. Las lecturas realizadas en los días posteriores se compararon entre sí y con la lectura obtenida al instante después de la irradiación para observar el porcentaje de información desvanecida en los dosímetros.

4.3.8. Influencia de las condiciones ambientales.

Los dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ se expusieron dentro de una matriz de acrílico transparente de 36 cm^2 directamente a la luz solar un período de 1 semana con el propósito de observar si son sensibles a la luz solar y a los rayos ultravioleta que atraviesan la capa de ozono. Las lecturas realizadas de los dosímetros en el equipo Harshaw TLD-3500 se compararon con lecturas obtenidas de las mismas pastillas que fueron almacenadas en el mismo período pero resguardadas de la luz. Con los resultados de las respuestas termoluminiscentes se estimó la sensibilidad del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ al medio ambiente.

4.3.9. Contribución de PTFE (Teflón).

Se elaboraron pastillas de teflón del mismo tamaño y peso de las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ con la finalidad de verificar la influencia del teflón en la irradiación en ^{60}Co , la lectura de los dosímetros elaborados se obtuvo en el equipo Harshaw TLD-3500, estas pastillas de teflón se irradiaron junto con los dosímetros a una dosis de 1Gy.

Capítulo V.

Resultados y Análisis.

En este capítulo se presentan las características morfológicas, estructurales, ópticas y termoluminiscentes del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtenido mediante el método de precipitación. Los resultados obtenidos son altamente favorables para ser considerado como detector de radiación ionizante.

5.1. Método de síntesis del sulfato de calcio dopado con disprosio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$).

Mediante la técnica de precipitación de soluciones iónicas y junto con cada una de las características estudiadas en los experimentos realizados para cada tipo de muestras, se obtuvieron polvos con características reproducibles. Además de resultar un método sencillo y práctico, comparado con otros métodos tradicionales para la síntesis de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, es menos nocivo tanto para quien los sintetiza como para el medio ambiente, ya que este método de preparación no desprende ningún tipo de químico cuando se lleva a cabo la reacción.

Los residuos de la reacción, que son principalmente sales en presencia de agua y etanol, son fáciles de desechar.

5.2. Caracterización morfológica, estructural y óptica.

5.2.1. Caracterización morfológica y estructural.

Microscopia Electrónica de Barrido y análisis EDS.

La figura 5.1 muestra una micrografía obtenida en el MEB para una muestra de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ con concentración de disprosio de 1%. Se observa un aglomerado uniforme en toda la micrografía; sin embargo debido a que el MEB no tiene un acercamiento suficiente el tamaño de grano en los aglomerados no se puede observar con esta técnica de caracterización.

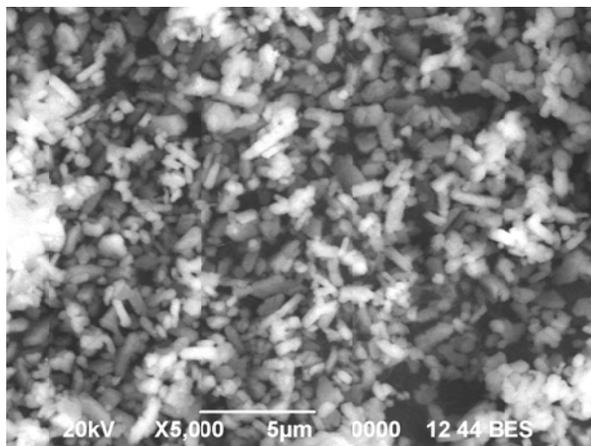


Figura 5.1. Micrografía de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ con 1% de concentración.

En la tabla 5.1 se presenta la composición química del compuesto, expresada en porcentaje de cada elemento presente en los polvos de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ provenientes de un análisis por EDS para una concentración del 1%.

Elemento	% en Peso	% Atómico
O	61.53	78.25
S	17.54	11.13
Ca	20.93	10.62
Total	100.00	100.00

Tabla. 5.1. Análisis EDS para 1% de disprosio en CaSO₄:Dy.

De la tabla 5.1 se observa que no se tiene la presencia del ion disprosio esto puede relacionarse con la baja concentración en peso (1 %) que se incorpora en la matriz de CaSO₄. También se cuenta con un porcentaje elevado de oxígeno debido a que por cada ion de azufre (S⁶⁺) se tienen presentes cuatro iones de oxígeno (O²⁻).

Las anteriores características no son suficientes para determinar si el material contiene disprosio. Esto puede deberse a que se tienen un bajo porcentaje en peso del disprosio en la matriz de CaSO₄.

Difracción de Rayos X.

Los resultados obtenidos mediante el método de difracción de rayos X se muestran en la figura 5.2. En el difractograma se observan los picos característicos del CaSO₄, que comparados con la base de datos de materiales se corrobora que el material es en realidad CaSO₄. Los datos obtenidos en la difracción muestran un sistema cristalino ortorrómbico con parámetros de celda primitiva a: 6.9933 Å, b: 7.0017 Å y c: 6.2411 Å.

Los picos de difracción están localizados a un valor de $2\theta = 25.51^\circ, 31.45^\circ, 36.36^\circ, 38.69^\circ, 40.89^\circ, 48.74^\circ, 52.31^\circ$ y 57.77° que corresponden a las reflexiones (020), (012), (220), (202), (212), (032), (400) y (331) respectivamente.

La determinación del tamaño de grano se realizó mediante la aplicación de la fórmula de Scherrer utilizando el pico de mayor intensidad (020), obteniendo un tamaño promedio estimado de partícula alrededor de 95.83 nm.

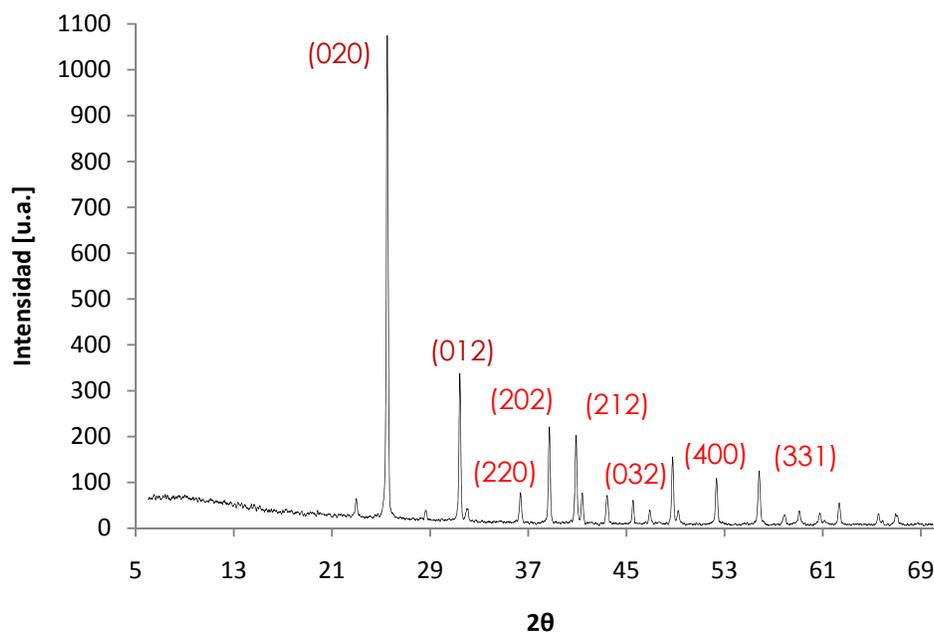


Figura 5.2. Difractograma de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ con 1% de concentración.

Como no se notó ningún corrimiento en los picos del difractograma que indicarían la presencia de otro elemento (en este caso disprosio) en el anhídrido de CaSO_4 . Por lo tanto se recurrió a la espectrometría UV-Vis para determinar si el disprosio se encuentra en el material.

5.2.2. Caracterización óptica.

La presencia de iones de Disprosio (Dy^{3+}) no se pudo determinar con los métodos de caracterización anteriores y se recurrió a la técnica de espectrometría fotoluminiscente para observar la excitación característica en los materiales sintetizados. La figura 5.3 muestra los espectros de emisión del

CaSO₄:Dy sintetizado con una concentración de 1 y 5%, con una longitud de excitación de 330nm.

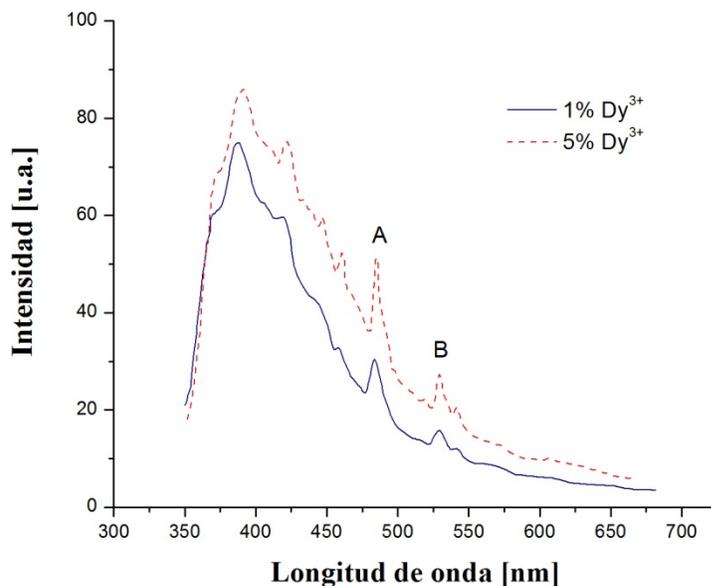


Figura 5.3. Espectro de emisión en polvos de CaSO₄:Dy para 1 y 5 % de disprosio.

Las transiciones características de emisión del Disprosio se observan en longitudes de onda aproximadas de 482 nm (A) y 573 nm (B), estas transiciones corresponden a $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$ y $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ respectivamente.

En la figura 5.3 donde se tienen la comparación del CaSO₄:Dy con diferentes concentraciones de Disprosio (Dy³⁺) para 1% línea continua y 5 % línea punteada, se observa que se presentan las mismas transiciones características del Dy³⁺ en los dos espectros de emisión.

5.3. Caracterización dosimétrica.

5.3.1. Respuesta en función de la concentración del dopante (Disproso).

Las concentraciones de disproso estudiadas en las muestras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ sintetizadas fueron de 0.1, 1 y 5 %. Se obtuvo la respuesta termoluminiscente para las distintas muestras irradiadas utilizando una fuente de ^{60}Co a una dosis absorbida de 10 Gy.

La tabla 5.2 muestra la respuesta termoluminiscente del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ al agregar diferentes porcentajes de concentración del dopante en donde se aprecia que el 1% de concentración de disproso mostró mayor intensidad y por lo tanto mejor respuesta a la radiación de ^{60}Co .

Concentración de Dy^{3+}	Respuesta Termoluminiscente
0.1 %	349.88 nC
1.0 %	16809.477 nC
5.0 %	12052.015 nC

Tabla. 5.2. Comparación de la respuesta TL para diferentes concentraciones de Dy^{3+} .

5.3.2. Tratamiento térmico de borrado.

Los polvos y las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtenidos se sometieron a una temperatura de 300°C durante 30 min para realizar el borrado de los mismos; esto es quitar toda la información remanente después de un ciclo de lectura en el lector termoluminiscente. Con el tratamiento térmico de borrado se restablecen las condiciones originales del material.

5.3.3. Homogeneización de los dosímetros.

Las pastillas elaboradas se pesaron una por una escogiendo las que estuvieran en el rango de 20 a 25 mg de peso, teniendo las mismas dimensiones de tamaño con 4 mm diámetro por 1 mm ancho.

Para la homogeneización de las pastillas en función de la dosis absorbida estas fueron leídas en el TLD-3500 y los resultados se presentan en la tabla 5.3 donde se observa que los datos varían desde 310.32 nC hasta 977.63 nC, se escogieron los valores termoluminiscentes más próximos para tener cuatro lotes de cuatro pastillas cada uno y tener respuestas semejantes en experimentos posteriores.

Pastilla	Dosis [nC]	Pastilla	Dosis [nC]	Pastillas	Dosis [nC]
NPL211	657.86	NPL231	767.51	NPL251	743.69
NPL212	741.26	NPL232	438.46	NPL252	793.62
NPL213	769.89	NPL233	905.97	NPL253	824.78
NPL214	310.32	NPL234	645.16	NPL254	887.35
NPL215	640.95	NPL235	584.60	NPL255	735.33
NPL221	973.07	NPL241	573.79		
NPL225	828.24	NPL242	776.95		
NPL223	488.56	NPL243	489.13		
NPL224	977.63	NPL244	490.70		
NPL225	785.19	NPL245	705.14		

Tabla5.3. Valores en dosis absorbida para las 25 pastillas.

Los lotes finales se distribuyen en la tabla 5.4:

LOTE 1		LOTE 2		LOTE 3		LOTE 4	
NPL 211	NPL212	NPL222	NPL225	NPL234	NPL242	NPL252	NPL253
NPL213	NPL215	NPL231	NPL233	NPL245	NPL251	NPL254	NPL255

Tabla5.4. Distribución de las pastillas para la experimentación.

5.3.4. Curva termoluminiscente.

La respuesta termoluminiscente del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ depende directamente de los parámetros de lectura y del lector utilizado.

En la figura 5.4 se observa la curva termoluminiscente dependiendo del equipo lector utilizado, también se muestra que lectura para el equipo TLD-3500 se tiene una intensidad mayor que la lectura del equipo TLD-4000, ambas muestras se irradiaron a 2 Gy con rayos gamma de ^{60}Co .

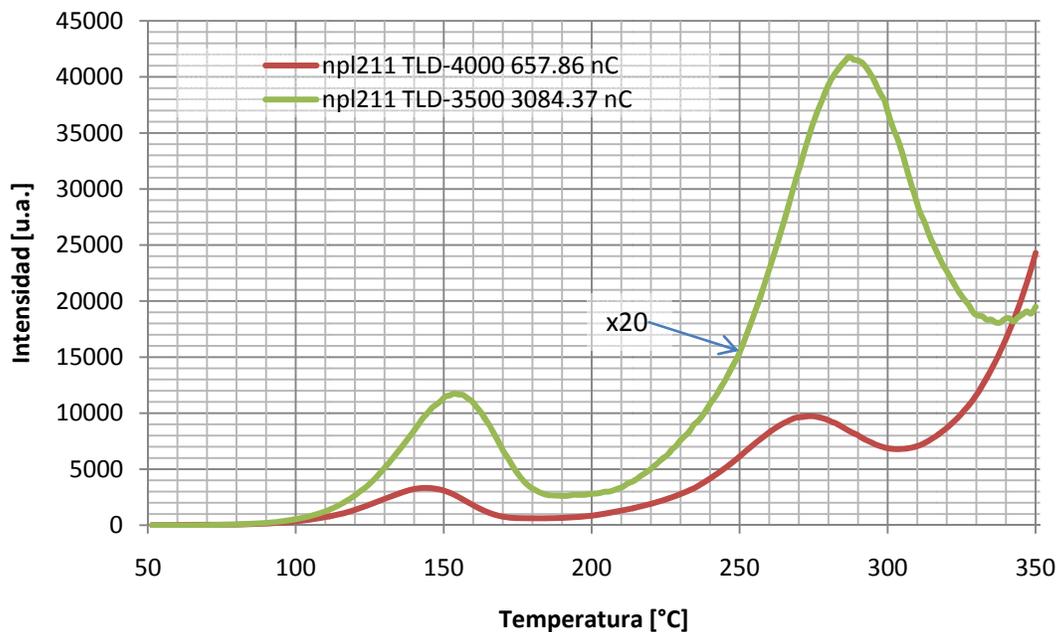


Figura 5.4. Gráficas termoluminiscentes de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtenidas en los equipos TLD-3500 y TLD-4000.

El cambio de intensidad dependiendo del equipo utilizado se debe principalmente a la sensibilidad del tubo fotomultiplicador instalado en los equipos, para el equipo TLD-3500 y basados en la figura 5.4 se tiene un tubo fotomultiplicador más sensible que en el equipo TLD-4000. A partir de este análisis, los datos reportados fueron obtenidos en el lector TLD-3500, por tener éste una sensibilidad mayor.

Una vez que se seleccionó el equipo lector más apropiado para las lecturas de los dosímetros de CaSO₄:Dy, se determinaron todas las características estudiadas en el material para la caracterización termoluminiscente.

Las propiedades de la curva termoluminiscente más adecuadas para la lectura de las pastillas de CaSO₄:Dy+PTFE se encontraron mediante la variación de los parámetros de lectura como temperatura de precalentamiento, temperatura máxima de calentamiento y rapidez de calentamiento.

Los parámetros se fueron variando como se observa en la tabla 5.5. De las respuestas obtenidas para cada una de las lecturas realizadas con los parámetros de la tabla 5.5, se eligieron las respuestas termoluminiscentes que presentan óptimas características dosimétricas.

Temperatura de precalentamiento (°C)	Temperatura máxima (°C)	Rapidez de calentamiento (°C/s)	Tiempo de adquisición (s)
50	350	2	150
100	400	2	150
		4	75
		5	60
		6	50
		10	30
		20	15
	450	2	175
		4	90
		5	70
		6	60
		10	36
		20	20
	500	2	200
		4	100
		5	80
		6	70
		10	40
		20	20
	600	2	250
		4	126
5		100	
6		83	
10		50	
20		26	

Tabla 5.5. Variación de parámetros de lectura del equipo TLD-3500.

Las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 muestran la relación que existe entre la variación de la rapidez de calentamiento y la posición de los picos máximos en las curvas termoluminiscentes; cuando se aumenta la rapidez de calentamiento los picos máximos van disminuyendo debido a la poca energía suministrada en las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}+\text{PTFE}$ por el aumento en la rapidez de calentamiento.

Se observa la aparición de nuevos picos conforme se aumenta la temperatura máxima de calentamiento, todas las graficas son obtenidas mediante la irradiación de las pastillas a 1 Gy.

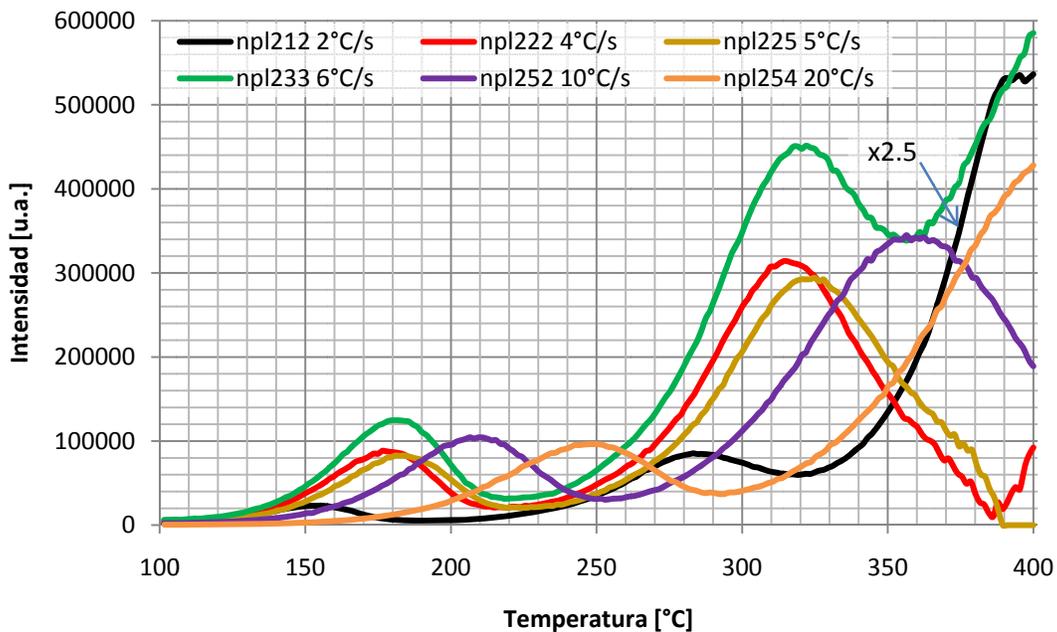


Figura 5.5. Grafica $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a una temperatura máxima de 400°C con diferente rapidez de calentamiento.

A medida que se incrementa la velocidad de calentamiento el número de picos dosimétricos disminuye. Este comportamiento es mostrado en la figura 5.5, donde se observa que se necesita una velocidad lenta de calentamiento para proporcionar suficiente energía a las trampas con el fin de medir la energía depositada en las mismas.

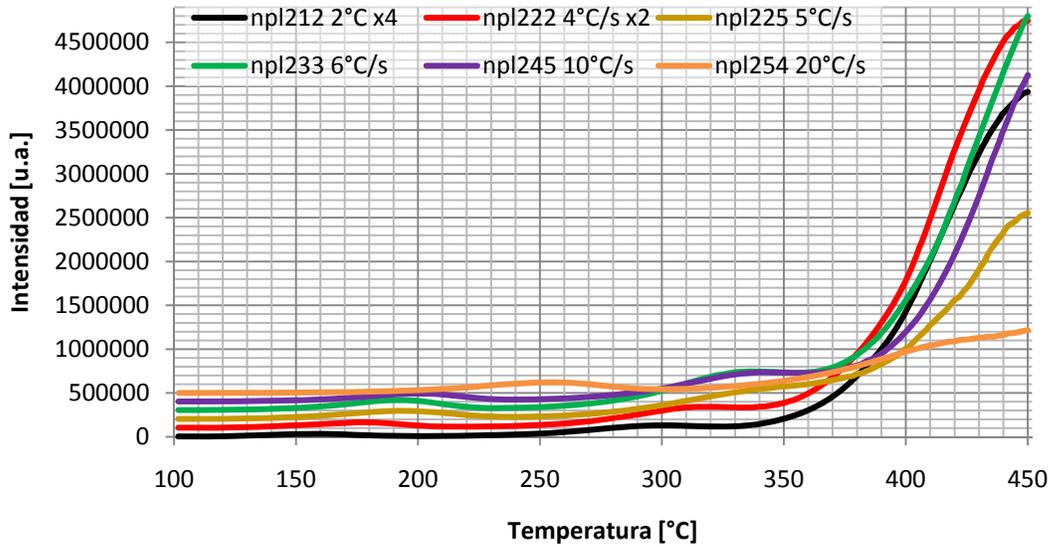


Figura 5.6. Gráfica CaSO₄:Dy a una temperatura máxima de 450°C con diferente rapidez de calentamiento.

En la figura 5.6 se observa que para una temperatura máxima de calentamiento de 450 °C se conservan tres picos a una rapidez de calentamiento de 2°C/s hasta 10°C/s y para las rapidez de 20°C/s se tiene un pérdida de información, solo se observa un pico.

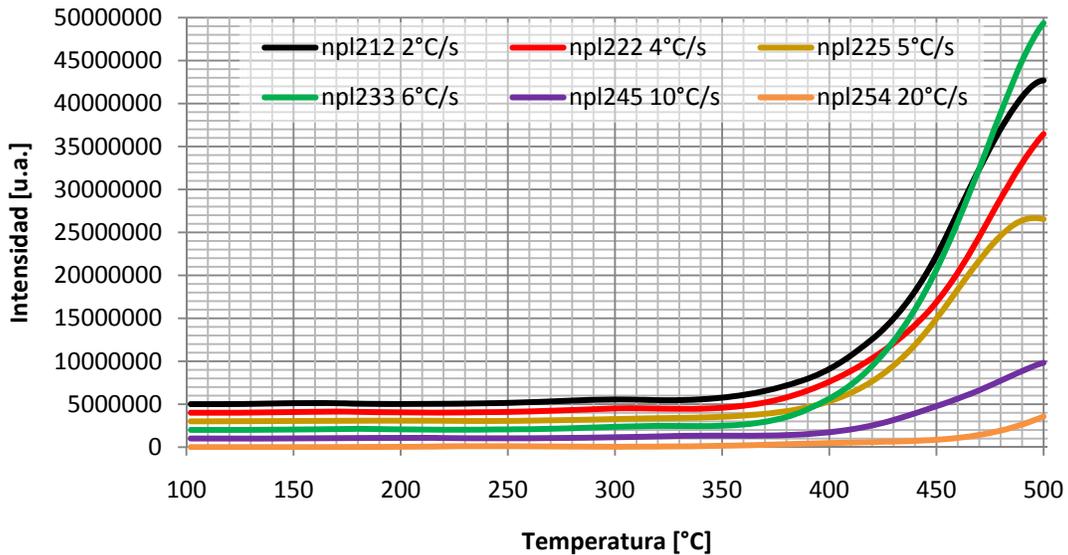


Figura 5.7. Gráfica CaSO₄:Dy a una temperatura máxima de 500°C con diferente rapidez de calentamiento.

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran las curvas TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}+\text{PTFE}$ obtenidas a una temperatura máxima de 500 °C y 600 °C respectivamente. Se observan intensidades altas en la parte final de las gráficas, lo que se podría interpretar como intensidades propias de las trampas más profundas, como luminiscencia intrínseca del material TL o incandescencia del teflón.

La incandescencia del teflón puede modificar la composición química del material cambiando al $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ en CaF_2 y DyF_3 debido a temperaturas elevadas que se utilizaron para obtener la respuesta termoluminiscente. Esto es posible debido a la investigación realizada por Laskshman y col. [36]

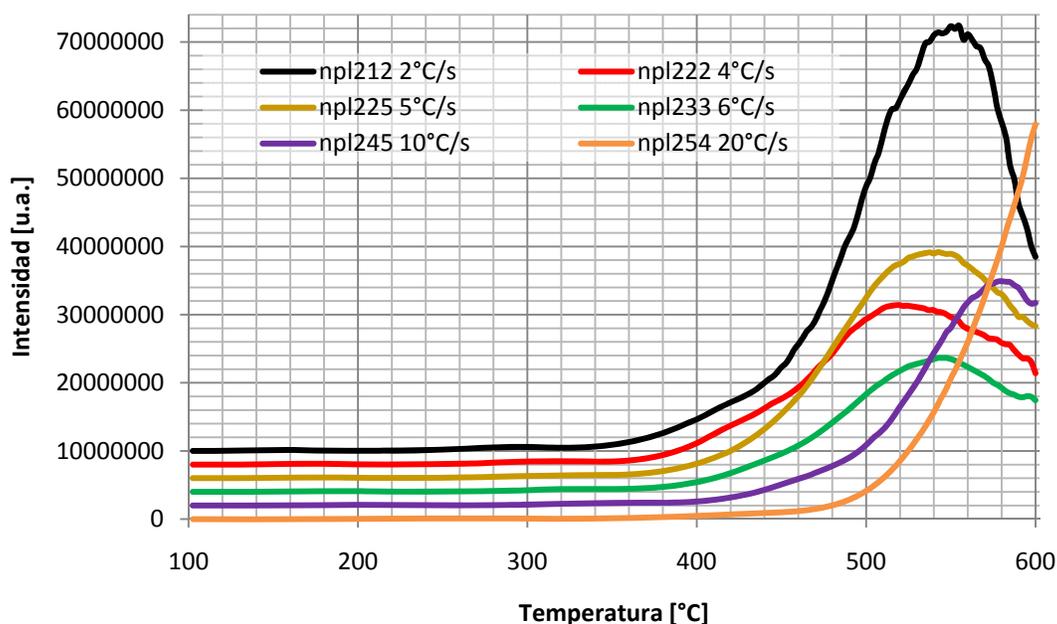


Figura 5.8. Gráfica $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a una temperatura máxima de 600°C con diferente rapidez de calentamiento.

Los parámetros de lectura en el equipo TLD-3500 establecidos para una medición óptima de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ depende mucho de los rangos de temperatura a los que se determine trabajar. Se recomienda bajo los resultados expuestos anteriormente que se podrían tener varias formas de lectura como se muestra en la tabla 5.6.

Temperatura de precalentamiento (°C)	Temperatura máxima (°C)	Rapidez de calentamiento (°C/s)	Tiempo de adquisición (s)
100	350	2	125
100	400	4	75
		5	60

Tabla 5.6. Parámetros de lectura del equipo TLD-3500 sugeridos.

5.3.5. Respuesta en función de la dosis (Linealidad).

La respuesta TL del CaSO₄:Dy+PTFE expuesto a diferentes dosis conocidas de radiación gamma de ⁶⁰Co se observa en la figura 5.9 la cual presenta una tendencia lineal hasta un valor de 30 Gy de dosis adsorbida. Esta respuesta permite obtener una curva de calibración o linealidad de la respuesta TL y utilizarla para determinar una dosis mediante interpolación en un material expuesto a un campo de radiación de ⁶⁰Co con intensidad desconocida.

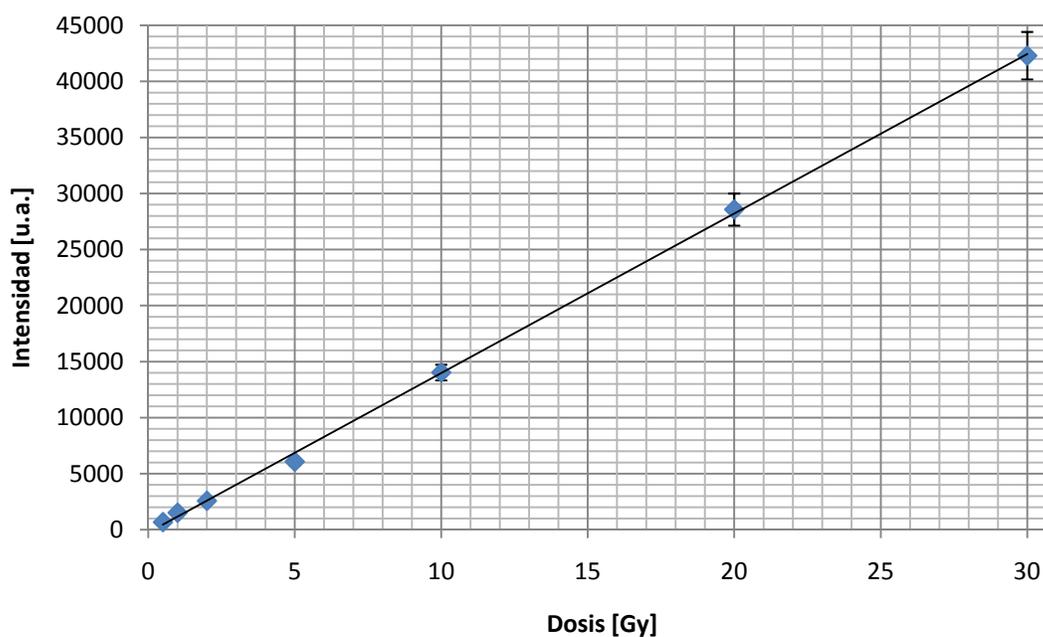


Figura 5.9. Linealidad para una fuente de ⁶⁰Co y lector TLD-3500.

La respuesta del CaSO₄:Dy presenta una tendencia lineal en una región de 0.5 a 30 Gy lo que se conoce como respuesta en función de la dosis, y se aprecia mejor en la figura 5.10.

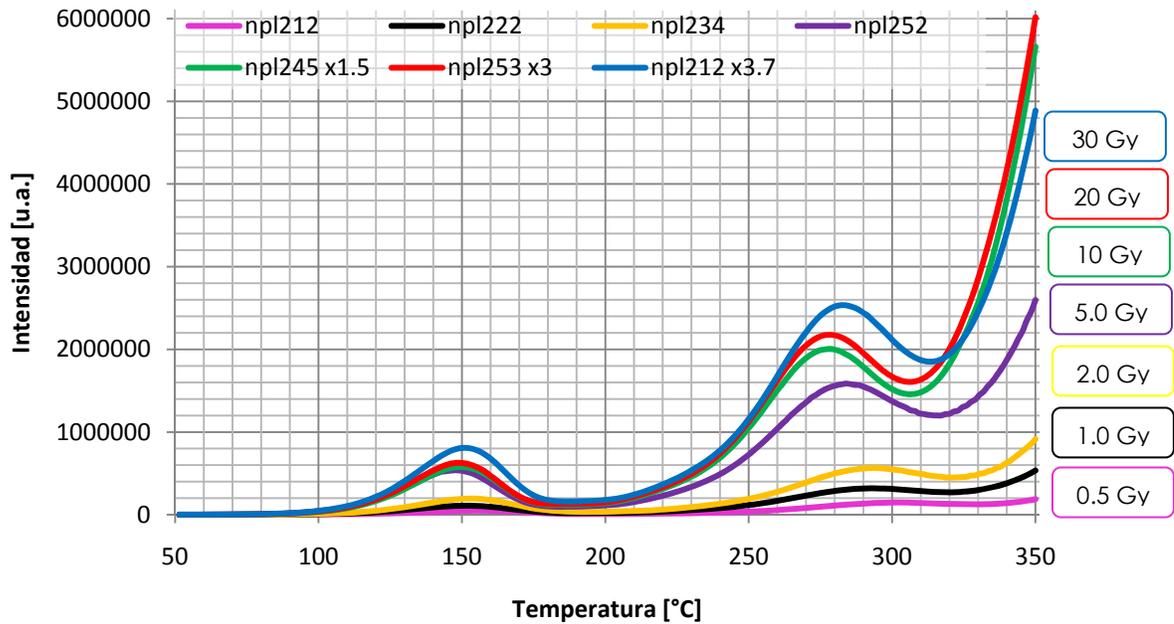


Figura 5.10. Gráficas de la respuesta para linealidad.

En la figura se puede observar que se conservan los picos y la temperatura máxima a la cual se presentan estos máximos. Este comportamiento se mantiene en todas las gráficas desde la primera irradiación de 0.5 Gy hasta la última de 30 Gy; lo único que cambia es la intensidad de las mismas.

5.3.6. Respuesta en función de la energía.

La respuesta termoluminiscente del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para diferentes energías se observa en la figura 5.11 donde la posición de los picos es casi la misma. La figura 5.11 muestra la comparación de la respuesta para partículas beta de ^{90}Sr y rayos gamma de ^{60}Co . En ambos experimentos las muestras fueron irradiadas a 1 Gy.

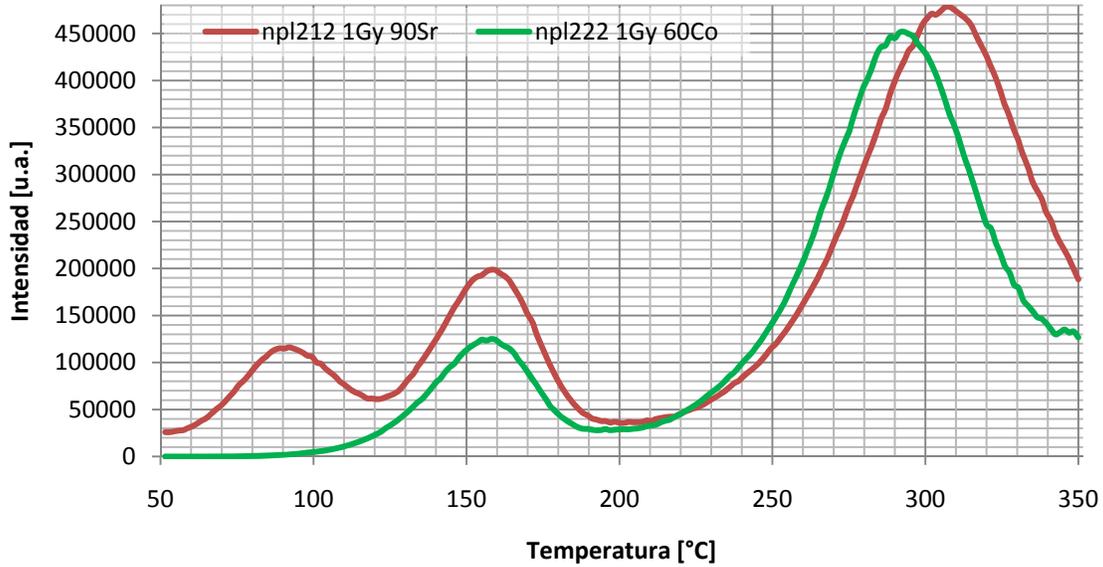


Figura 5.11. Comparación de curvas TL para diferentes fuentes de radiación.

De la figura 5.11 se observa que para la fuente de partículas beta se presenta un pico inicial a 92°C, el cual puede deberse a la existencia de trampas a bajas energías y se genera por el alcance de radiación beta. Los siguientes dos picos son semejantes para las energías de 1.25 MeV y 662 keV correspondientes a las fuentes de ⁶⁰Co y ⁹⁰Sr.

Las pastillas de CaSO₄:Dy tienen respuesta termoluminiscente ante tres tipos de fuentes de radiación con energías diferentes. En la tabla 5.7 se observan las mediciones realizadas para rayos gamma y partículas beta.

Tipo de energía	⁶⁰ Co γ (1.25 MeV)	¹³⁷ Cs γ (662 keV)	⁹⁰ Sr β ⁻ (546 keV)
Lectura TLD-3500	1561.918 nC	347.392 nC	2061.196 nC

Tabla 5.7. Respuesta termoluminiscente para diferentes energías.

El material sintetizado tiene respuesta a diferentes rangos de energía incidente no importando el tipo de fuente que emite esta energía, mientras esté en los límites de detección se tendrá respuesta termoluminiscente.

5.3.7. Repetibilidad.

La respuesta obtenida de un detector de estado sólido depende de la excitación de las trampas mediante un haz de radiación, como la radiación genera dislocaciones (modificación en la red cristalina) en la red cristalina del detector conforme es utilizado, se debe tener un tiempo de uso en el detector en este caso número de ciclos (irradiación, lectura y borrado).

La desviación estándar relativa de los promedios normalizados proporciona un valor de 4 %, mientras que el promedio normalizado se encuentra con un valor de 1.

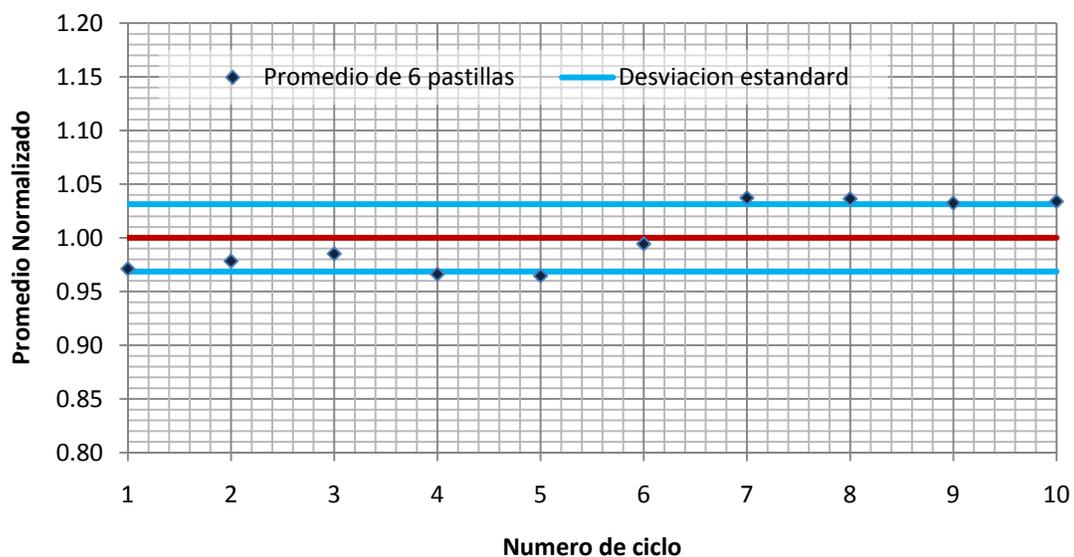


Figura 5.12. Gráfica de repetibilidad de la respuesta TL del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

La figura 5.12 muestra la curva de repetibilidad con límites superior e inferior de la desviación estándar de las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Se aprecia que la repetibilidad depende también de los factores del ciclo (irradiación, lectura y borrado).

5.3.8. Sensibilidad.

La referencia para obtener la sensibilidad relativa de las pastillas de CaSO₄:Dy es el TLD-100 (LiF) un dosímetro comercial, en la tabla 5.9 se muestran las sensibilidades relativas para dos pastillas de CaSO₄:Dy+PTFE y TLD-100 donde para las pastillas identificadas como NPL233 y NPL254 se presenta una sensibilidad de 1.24, 1.28 y 1.27, 1.31 veces mayor que las pastillas de TLD-100.

CaSO ₄ :Dy+PTFE	TL-100	TLD-100 α
npl233	1.24	1.28
npl254	1.27	1.31

Tabla 5.9. Sensibilidad relativa del CaSO₄:Dy.

La figura 5.13 muestra la comparación de la respuesta TL a través de las gráficas para la sensibilidad de CaSO₄:Dy donde se observa que a partir de la grafica no se puede estimar una sensibilidad por la distribución de la energía en los picos máximos, por lo tanto solo se puede estimar mediante la respuesta total debida a la integración de las curvas TL.

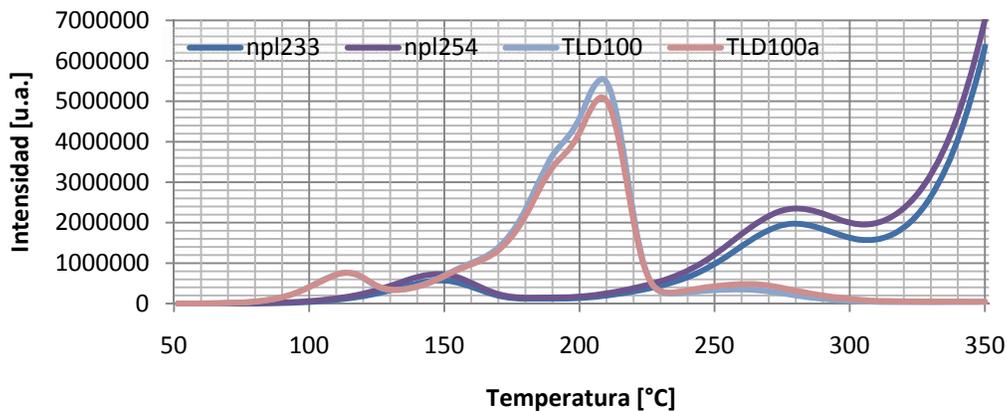


Figura 5.13. Comparación de la sensibilidad del TLD-100 y el CaSO₄:Dy

5.3.9. Desvanecimiento.

La pérdida de información en función del tiempo de pos-irradiación de las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ se observa en el intervalo de 2 a 39 días. En la figura 5.14 se presenta que la intensidad va disminuyendo con el transcurso del tiempo. Esta gráfica muestra un porcentaje de 8.84 % de pérdida de información para el período de 39 días; pero en los primeros dos días después de la irradiación se tiene una pérdida de información del 3.65 % y para los siguientes 37 días la pérdida de información es de 5.19 %.

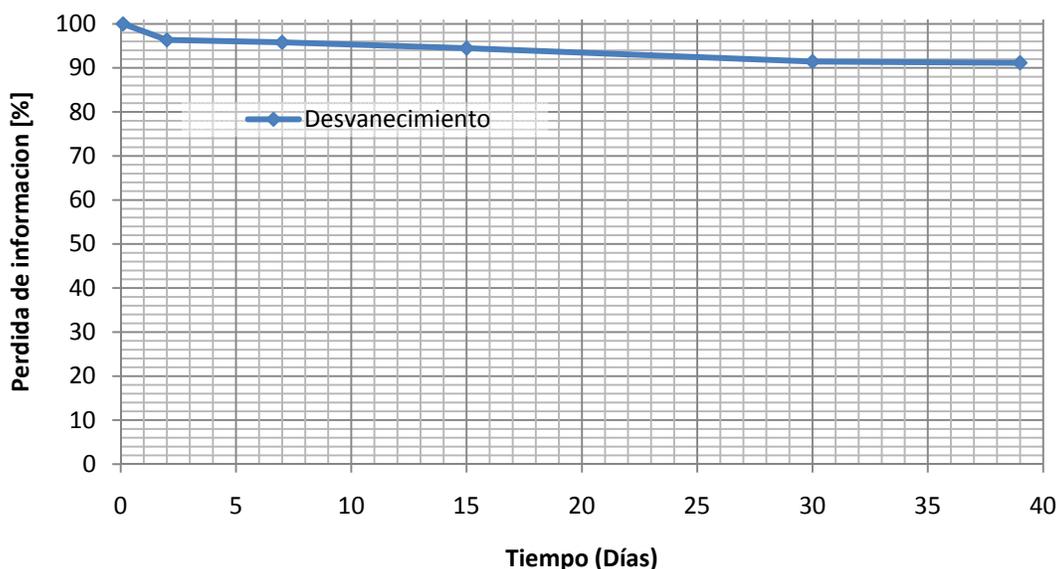


Figura 5.14. Desvanecimiento de la información del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

5.3.10. Influencia de las condiciones ambientales.

La radiación proveniente del sol puede ser una de las principales causas de error en las mediciones al usar dosímetros de estado sólido. La contribución de información en el dosímetro por parte de este tipo de fuente de radiación se presenta en la figura 5.15, las gráficas representan la contribución ambiental en

un período de una semana comparado con los mismos dosímetros almacenados durante el mismo tiempo.

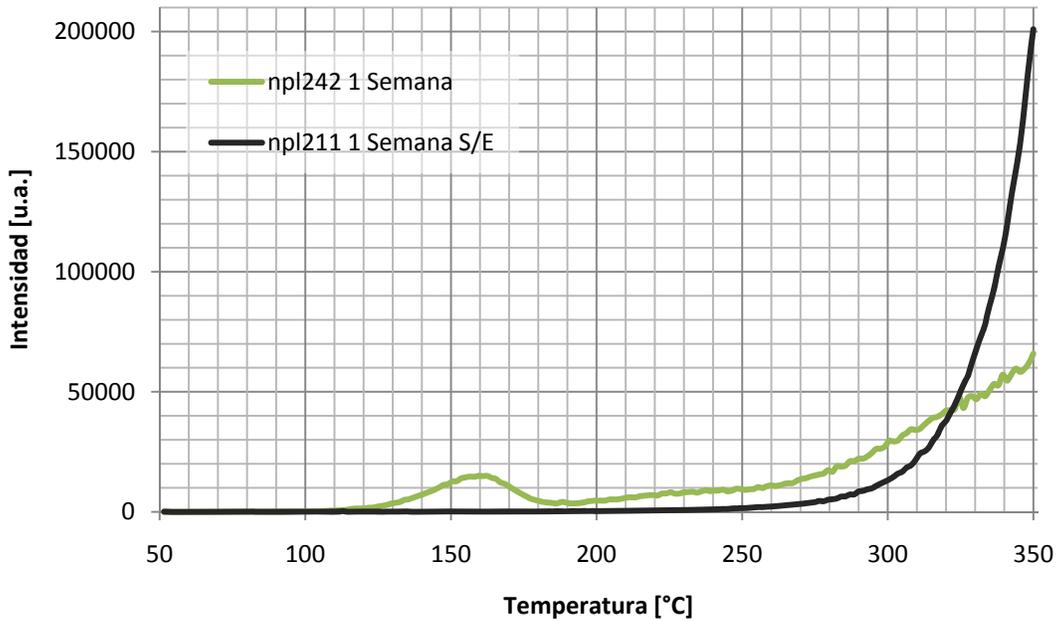


Figura 5.15. Respuesta TL del CaSO₄:Dy con y sin exposición a la luz solar.

En la gráfica del CaSO₄:Dy+PTFE expuesto a la luz solar durante 1 semana se alcanza a definir el primer pico a una temperatura aproximada de 161°C con una intensidad de 170.558 nC, que comparada con la intensidad de 160.16 nC de la gráfica del CaSO₄:Dy+PTFE sin irradiar se tiene una sensibilidad a la luz solar en condiciones extremas.

A pesar de que las pastillas de CaSO₄:Dy presentan respuesta a las condiciones ambientales en tiempos prolongados, esta respuesta no tiene contribución directa en las mediciones de las pastillas que no se exponen a condiciones ambientales.

5.3.11. Contribución de PTFE (Teflón).

Para las pastillas de 25 mg de CaSO₄:Dy+PTFE se tiene una contribución del teflón del 6.2 % de la respuesta total. La contribución del teflón en las pastillas de

CaSO₄:Dy se puede eliminar realizando una segunda lectura a las pastillas y el valor obtenido restarlo al valor de la primera lectura. Para la obtención de los datos en este experimento, las pastillas fueron irradiadas a una dosis de 1Gy con radiación gamma de ⁶⁰Co.

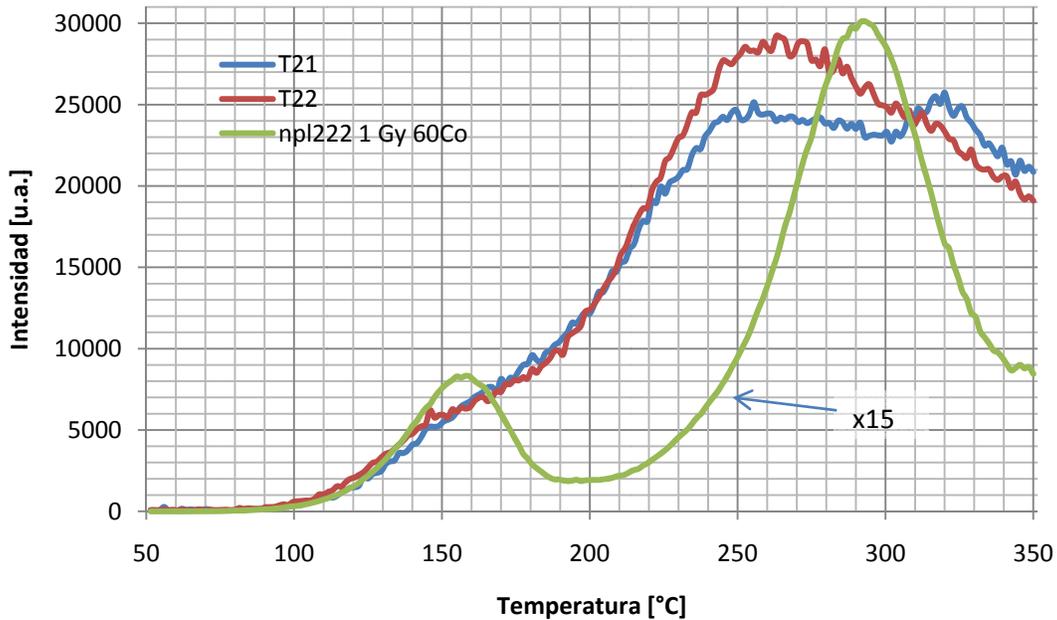


Figura 5.16. Respuesta del teflón irradiado con radiación gamma de ⁶⁰Co.

En la figura 5.16 se observa la intensidad de dos pastillas de teflón comparadas con la curva de una pastilla de CaSO₄:Dy+PTFE, se aprecia que la intensidad de las pastillas del CaSO₄:Dy es 15 veces mayor a la intensidad del teflón. Por lo tanto se considera que el teflón no contribuye a la respuesta TL.

Capítulo VI.

Conclusiones y Trabajo a Futuro.

6.1. Conclusiones.

El método de precipitación utilizado en la síntesis de los polvos de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ presenta resultados favorables para ser utilizado en la obtención de materiales termoluminiscentes. Este método presenta grandes ventajas con respecto a los métodos tradicionales debido a que no es agresivo con el medio ambiente.

Mediante el método de precipitación se obtienen los polvos de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ en muy poco tiempo, es un método de síntesis reproducible debido a que no necesita tantos equipos de laboratorio para la síntesis de las muestras, además es barato.

Las características estructurales, químicas y morfológicas estudiadas para determinar las propiedades físicas del material permitieron definir la forma y composición química del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Las características ópticas confirmaron la incorporación del material dopante en la matriz de CaSO_4 .

Considerando los resultados obtenidos durante el análisis y caracterización dosimétrica del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para toda la experimentación del presente trabajo, el porcentaje óptimo del material dopante utilizado fue del 1 % en el $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, por

Capítulo 6: Conclusiones y Trabajo a Futuro.

presentar la mayor respuesta en la mediciones realizadas para esta concentración.

El teflón utilizado para el sinterizado de las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ tiene respuesta a la radiación de ^{60}Co en las mediciones termoluminiscentes realizadas, pero no contribuye directamente en la respuesta TL total del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

La exposición de la radiación solar de las pastillas utilizadas presentan respuesta de lectura de fondo en las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ y por lo tanto se concluye que el $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ no es sensible a la radiación solar.

De las mediciones realizadas para las diversas fuentes de radiación utilizadas a lo largo de la experimentación, las pastillas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ presentan respuesta tanto para rayos gamma de ^{60}Co , ^{137}Cs y para partículas beta. Mediante el análisis de los resultados obtenidos los dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ se recomienda utilizar en la detección de la radiación gamma de ^{60}Co .

La respuesta termoluminiscente del $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ en función de la dosis absorbida, expuesta a radiación gamma de ^{60}Co , presenta una respuesta lineal en el intervalo de 0.5 hasta 30 Gy, esta respuesta permite concluir que el material tiene un intervalo amplio de aplicación en radioterapia, monitoreo ambiental y de área.

El desvanecimiento observado en el $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ elaborado en forma de pastillas, después de la irradiación con rayos gamma de ^{60}Co , presentan un porcentaje de pérdida de información de 5.19 % en 37 días lo que indica que el material de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ es estable en periodos de tiempo grandes.

6.2. Trabajo a futuro.

Realizar un estudio completo sobre diferentes concentraciones de disprosio para encontrar el porcentaje en donde se obtiene una mejor respuesta termoluminiscente.

Estudiar la relación entre al tamaño de grano y la respuesta termoluminiscente utilizando el mismo método de síntesis.

Estudiar la profundidad de las trampas presentes en el material para y relacionarlas en la emisión del material.

Preparar pastillas de CaSO₄:Dy sin presencia de teflón para determinar la máxima temperatura de luminiscencia del material, sin la presencia de agentes externos que influyan en la respuesta.

Establecer la linealidad completa en el material, es decir la máxima dosis absorbida que puede medir el CaSO₄:Dy antes de la supralinealidad y saturación.

Referencias.

- [1] Ortega A. X. y Bisbal J. J. Radiaciones Ionizantes: Utilización y Riesgos I. Edicions UPC. 1ra Ed. 1994.
- [2] Attix F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. A Wiley-Interscience publication. 1986.
- [3] Yamashita T., Nada N., Onishi H. and Kitamura S. Calcium Sulphate Activated by Thulium or Dysprosium for Thermoluminescence Dosimetry. Health Phys. Vol. 21(1971) pp. 295-300.
- [4] Akihiro T. and Kenjiro T. Emmission Spectra of Termoluminescence in $CaSO_4$. J. Appl. Phys. Vol. 17 (1978) pp. 453-454.
- [5] Aypar A. Studies on Thermoluminescent $CaSO_4:Dy$ for Dosimetry. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. Vol. 29 (1978) pp. 369-372.
- [6] Shinde S. S. and Shastry S. S. Relative Thermoluminescence Response of $CaSO_4:Dy$ to Alpha and Gamma Rays. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. Vol. 30 (1979) pp. 75-78.
- [7] Shastry S. S., Shinde S. S. and Bhatt R. C. Thermoluminescence Response of $CaSO_4:Dy$ Sintered Pellets. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. Vol. 31 (1980) pp. 244-245.
- [8] Mulla M. R. and Pawar S.H. Spectral Studies on Luminescence of Dy^{3+} in $CaSO_4$ phosphors. Journal of Luminescence. Vol. 31 (1984) pp. 239-241.
- [9] Campos L. L. Determination of TL Parameters of $CaSO_4:Dy$ Produced at Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Appl. Radiat. Isot. Vol 39. (1988) pp. 233-236.

Referencias.

- [10] Spurný F. and Votocková I. Response of Some Thermoluminescent Detectors to Alpha Particles. Radiation Measurements. Vol 23. (1994) pp. 247-249.
- [11] Mathur V. K., Lewandowski A. C., Guardala N. A. and Price J. L. High Dose Measurements Using Thermoluminescence of CaSO₄:Dy. Radiation Measurements. Vol 30. (1999) pp. 735-738.
- [12] Chang J. K., Nam Y. M., Kim J. L., Chang S. Y. and Kim B. H. Calculated Energy Dependence of CaSO₄:Dy TL Phosphors and Phosphor Embedded Teflon for X and Gamma Rays. Radiation Measurements. Vol 33. (2001) pp. 675-678.
- [13] Numan S., Sahare P.D., Lochab S.P. and Kumar P. TL and PL studies on CaSO₄: Dy nanoparticles. Radiation Measurements. Vol. 41 (2006) pp.40-47.
- [14] Bhattacharyya D., Bakshi A. K., Ciatto G., Aquilanti G., Pradhan A. S. and Pascarelli S. Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) study of CaSO₄:Dy Phosphors. Solid State Communications. Vol. 137 (2006) pp. 650-653.
- [15] Ingle N. B., Omanwar S. K., Muthal P. L., Dhopte S. M., Kondawar V. K., Gundurao T. K. and Moharil S. V. Synthesis of CaSO₄:Dy, CaSO₄:Eu³⁺ and CaSO₄:Eu²⁺ Phosphors. Radiation Measurements Vol. 43 (2008) pp. 1191-1197.
- [16] Shinsho K., Harada K., Yamamoto Y. and Urushiyama. Differences in Glow Curves Structure of Nano- and Microcrystals of CaSO₄:Dy Measured at a low Heating Rate. Radiation Measurements Vol. 43 (2008) pp. 236-240.
- [17] Oberhofer M. and Scharmann A. Applied Thermoluminescence Dosimetry. Adam Hilger Ltd.
- [18] Azorin J., Gutierrez A. and Martinez C. G. Determination of Activation Energies and Frequency Factors of CaSO₄:Dy Thermoluminescent Dosimeters. Radiation Effects. Vol. 4 (1985) pp. 263-280.
- [19] Azorin J., Gonzalez G., Gutierrez A. and Salvi R. Preparation and Dosimetric Properties of a Highly Sensitive CaSO₄:Dy Thermoluminescent Dosimeter. Health Physics. Vol. 46 (1984) pp. 269-274.
- [20] Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Radiation Protection Manual. May 1997.
- [21] Khan F. M. The Physics of Radiation Therapy. Lippincott Williams and Wilkins. 3th Ed. 2003.
- [22] Podgorsak. E. B. Radiation Physics for Medical Physicists. Springer. 2006.
- [23] Poston. J. W. Dosimetry. Texas A. and M. University

- [24] Johns H. E. and Cunningham J. R. *The Physics of radiology*. Charles C. Thomas · Publisher. 4th Ed. 1983.
- [25] Esam M. A. Hussein. *Radiation Mechanics: Principles and Practice*. Ed. Elsevier. 1st Ed. 2007.
- [26] McKeever S. W. S. *Thermoluminescence of solids*. Cambridge University Press. 1983.
- [27] Furetta C. *Handbook of Thermoluminescence*. World Scientific. 2003.
- [28] Dyke K. V., Dyke C. V. and Woodfork K. *Luminiscence Biotechnology: Instruments and Applications*. CRC Press. 2002.
- [29] Gschneidner K. A. Jr. and Eyring L. *Handbook on the physics and chemistry of Rare Earths*. Elsevier Science. Vol. 28. 2000.
- [30] G. Shani. *Radiation Dosimetry: Instrumentation and Methods*. CRC Press. Second Edition. 2001.
- [31] Stabin M. G. *Fundamentals of Nuclear Medicine Dosimetry*. Springer. 2008.
- [32] Bos A. J. J. *Theory of Thermoluminescence*. Radiation Measurements. Vol. 41 (2007) pp. S45-S46.
- [33] Amelinckx S., Van Dyck D., Van Landuyt J., Van Tendeloo G. *Handbook of Microscopy*. Vol. 2. 1997.
- [34] Vitalij K., Pecharsky and Peter Y. Zavalij. *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*. Sec. Ed., Springer (2008).
- [35] Nikolai V. Trachenko. *Optical Spectroscopy Methods and Instrumentations*. First Ed. Elsevier (2006).
- [36] Lakshmanan A. R. and Madhusoodanan U. *Behaviour of CaSO₄:Dy Embedded Teflon Discs at High Annealing Temperatures*. Radiation Measurements. Vol. 29 No. 5. (1998) pp. 527-530.

Anexo: A

Productos del Trabajo de Tesis.

Ponencia en la sesión de estudiantes del XIX Congreso Anual: Átomos para el Desarrollo de México. Sociedad Nuclear Mexicana. Mérida, Yucatán. 6 al 9 Julio de 2008.

Participación en el congreso 7th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Application (IRRMA). Que se llevó a cabo en Praga, Republica Checa del 22 al 27 Junio del 2008.

Participación en el LI Congreso Nacional de Física y II Congreso Latinoamericano de Física. Que se llevo a cabo en la ciudad de Zacatecas del 20 al 24 de octubre del 2008.

Trabajo enviado a la revista internacional Journal of Applied Radiation.

Resumen publicado en la revista de tecnología avanzada del CICATA-LEG con nombre 1er Simposio de Tecnología Avanzada.

Participación en el congreso de Lumdetr 2009. En la ciudad de Polonia del 12 al 17 Julio.