



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**

**INSTITUTO NACIONAL DE
CIENCIAS MÉDICAS Y NUTRICIÓN**

“Dr. Salvador Zubirán”



INCMNSZ

FACULTAD DE MEDICINA

*“Caracterización de la respuesta
termoluminiscente de cristales de LiF,
CaF₂ y vidrios de Li₂B₄O₇ irradiados
con rayos X de 6 MV”*

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN FÍSICA MÉDICA**

P R E S E N T A

César Rafael Castillo Ochoa

Comité de Tutores: Dr. en C.S. Miguel Ángel Camacho López
Dr. en C.S. Miguel Ángel Vallejo Hernández
Dra. en C.S. Elsa Yazmín León Marroquín



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO 2024

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	18
2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	21
2.2. HIPOTÉISIS	21
2.3. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICIOS	21
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	22
3.1. DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE.....	22
3.2. FENÓMENO DE TERMOLUMINISCENCIA.....	23
3.3. CRISTALES DE LiF.....	26
3.4. CRISTALES DE CaF ₂	27
3.5. VIDRIOS DE Li ₂ B ₄ O ₇	28
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA	30
4.1. INFRESTRUCTURA Y APOYO TÉCNICO DISPONIBLE.....	30
4.2. MATERIALES Y EQUIPO.....	30
4.2.1. Acelerador lineal Varian TrueBeam	30
4.2.2. Maniquí de agua sólida Plastic Water® DT - 50 keV - 15 MeV.....	31
4.2.3. Matrices de cristales de LiF, CaF ₂ y vidrios de Li ₂ B ₄ O ₇	31
4.2.4. Lexsyg Smart Freiberg Instruments	32
4.2.5. Software ORIGIN PRO-2016	33
4.2.6. Software TLAnal.....	34
4.3. SÍNTESIS DE CRISTALES DE LiF	34
4.4. SÍNTESIS DE CRISTALES DE CaF ₂	36
4.5. SÍNTESIS DE VIDRIOS DE Li ₂ B ₄ O ₇	38
4.6. CONDICIONES DE IRRADIACIÓN	40
4.7. LECTURA DE LAS MATRICES	41
4.8. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA TL.....	42
4.8.1. Respuesta termoluminiscente de los materiales	43
4.8.2. Parámetros cinéticos	44
4.8.3. Reproducibilidad en la respuesta TL.....	45
4.8.4. Curva de Dosis-Respuesta.....	45
4.8.5. Fading.....	45

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1. RESPUESTA TERMOLUMINISCENTE.....	46
5.2. PÁRAMETROS CINÉTICOS	50
5.3. REPRODUCIBILIDAD	53
5.4. CURVA DE DOSIS-RESPUESTA	54
5.5. FADING	57
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	61
REFERENCIAS	63
ANEXOS	66

RESUMEN

Los dosímetros desempeñan un papel fundamental en la medición de la dosis de radiación absorbida por los individuos en entornos con exposición a radiaciones ionizantes. Existen diferentes tipos de dosímetros disponibles en el mercado, como, las cámaras de ionización, películas radiocrómicas, diodos, dosímetros luminiscentes ópticamente estimulados (OSL, por sus siglas en inglés) y los dosímetros termoluminiscentes (TLD, por sus siglas en inglés), que utilizan diferentes procesos físicos para registrar la dosis recibida.

En este estudio, nos centraremos en los dosímetros termoluminiscentes, que funcionan almacenando electrones en los defectos de los cristales debido a la interacción de la radiación y que luego se calientan en un determinado rango de temperatura, generando así el fenómeno de termoluminiscencia. Investigaremos conjuntos de dosímetros que contengan materiales como LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇. Existe un interés creciente en el uso de estas matrices en aplicaciones clínicas, como la radioterapia y la medicina nuclear, especialmente cuando están dopados con nanopartículas o tierras raras, ya que han demostrado ser altamente sensibles a los rayos X de baja energía.

Para evaluar la idoneidad de estas matrices como dosímetros en entornos clínicos, se irradiarán con rayos X de alta energía, generados por un acelerador lineal clínico y se evaluarán tanto las curvas de brillo, como los parámetros cinéticos y la respuesta a diferentes dosis.

SUMMARY

Dosimeters play a key role in measuring the radiation dose absorbed by individuals in environments with exposure to ionizing radiation. There are different types of dosimeters available on the market, such as optically stimulated dosimeters (OSL) and thermoluminescent dosimeters (TLD), which use different physical processes to record the dose received.

In this study, we will focus on thermoluminescent dosimeters, which work by storing electrons in the defects of the crystals because of the interaction of radiation and are then heated in a certain temperature range, thus generating the thermoluminescence phenomenon. We will investigate dosimeter arrays containing materials such as LiF, CaF₂ and Li₂B₄O₇. There is growing interest in the use of these arrays in clinical applications, such as radiotherapy and nuclear medicine, especially when doped with nanoparticles or rare earths, as they have been shown to be highly sensitive to low energy X-rays.

To evaluate the suitability of these arrays as dosimeters in clinical environments, they will be tested for exposure to high energy X-rays, generated by a clinical accelerator and to corroborate both glow curves, kinetic parameters and response to different doses under these irradiation conditions.

ABREVIATURAS

- **MV:** Megavolts.
- **Gy:** Gray.
- **LiF:** Fluoruro de litio.
- **CaF₂:** Fluoruro de calcio.
- **Li₂B₄O₇:** Tetraborato de litio o borato de litio.
- **OSLD:** Dosímetros luminiscentes ópticamente estimulados.
- **TLD:** Dosímetros termoluminiscentes.
- **TL:** Termoluminiscencia.
- **R:** Roentgen.
- **AgNPs:** Nanopartículas de plata.
- **Dy:** Disprosio.
- **Yb:** Iterbio.
- **Cu:** Cobre.
- **Eu:** Europio.
- **ADN:** Ácido desoxirribonucleico.
- **OAR's:** Órganos de riesgo.
- **CGCD:** Análisis de deconvolución computarizada.
- **FOM:** Figure of Merit o Figura de Mérito.

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.2.1. Ejemplo de curva de brillo. Cada pico corresponde a una trampa bien definida.	24
Figura 3.2.2. Procesos producidos en la estructura cristalina por irradiación	26
Figura 3.3.1. Estructura tridimensional de un cristal de LiF.	27
Figura 3.4.1 Estructura tridimensional de un cristal de CaF ₂	27
Figura 3.5.1. Estructura química del borato de litio Li ₂ B ₄ O ₇	29
Figura 4.2.1.1. Acelerador lineal Varian TrueBeam.	30
Figura 4.2.2.1. Maniquí de agua sólida Plastic Water®.	31
Figura 4.2.3.1. Matrices de LiF, CaF ₂ and Li ₂ B ₄ O ₇	31
Figura 4.2.4.1. Lexsyg smart Freiberg Instruments.	32
Figura 4.3.1. Imágenes SEM de los cristales de LiF sintetizados utilizando diferentes alcoholes como cosolventes.....	35
Figura 4.3.2. Patrón de difracción de rayos X de los cristales de LiF.....	36
Figura 4.4.1. Patrón de difracción de rayos X de cristales de CaF ₂	37
Figura 4.4.2. Imágenes SEM de los cristales de CaF ₂ sintetizados	37
Figura 4.5.1. Difracción de RX de las muestras	39
Figura 4.6.1. Esquema experimental de la irradiación de las matrices.	40
Figura 4.6.2. Colocación de matrices en los portadosímetros en el campo.	41
Figura 4.6.3. SSD a 100cm y colocación de placas para la irradiación de las matrices.	41
Figura 4.7.1. Lector de termoluminiscencia Lexsyg Smart ubicado en CICTACTA.....	42
Figura 4.7.2. Porta muestra del Lexsyg Smart donde se ubicaron los vidrios y cristales. ..	42
Figura 4.8.1.1. Esquema gráfico del proceso de la termoluminiscencia	43
Figura 5.1.1. Curvas de brillo de los cristales de fluoruro de litio irradiados a 3 Gy con rayos X de 6 MV para los diferentes cosolventes: LiF A (fluoruro de litio con cosolventes de agua), LiF M (fluoruro de litio con cosolventes de metanol), LiF E (fluoruro de litio con cosolventes de etanol) y LiF P (fluoruro de litio con cosolventes de propanol).	47
Figura 5.1.2. Curvas de brillo de los cristales de fluoruro de calcio irradiados a 3 Gy con rayos X de 6 MV para los diferentes cosolventes: CaF ₂ A (fluoruro de calcio con cosolventes de agua), CaF ₂ M (fluoruro de calcio con cosolventes de metanol), CaF ₂ E (fluoruro de calcio con cosolventes de etanol) y CaF ₂ P (fluoruro de calcio con cosolventes de propanol).	48
Figura 5.1.3. Curvas de brillo de vidrios de borato de litio expuestos a una dosis de 3 Gy para los vidrios de del borato de litio con dopado con tierras raras 50% de masa de iterbio y disprosio con un 2% de masa de nanopartículas de cobre (Cu ₂) y borato de litio con 50% de masa de disprosio e iterbio con un 8% de masa de nanopartículas de cobre (Cu ₅).	49

Figura 5.2.1. Deconvolución computarizada de cristal de fluoruro de litio con cosolvente de etanol (LiF E).....	50
Figura 5.2.2. Deconvolución computarizada de cristal de fluoruro de calcio con cosolvente de agua (CaF ₂ A).	51
Figura 5.2.3. Deconvolución computarizada de vidrio de borato de litio dopado con tierras raras y nanopartículas de cobre (Cu ₂).	52
Figura 5.4.1. Dosis-respuesta de los cristales de fluoruro de litio (LiF) a 1, 3 y 6 Gy con rayos X de alta energía.	54
Figura 5.4.2. Dosis-respuesta de los cristales de fluoruro de calcio (CaF ₂) a 1, 3 y 6 Gy con rayos X de alta energía.	55
Figura 5.4.3. Dosis-respuesta de los vidrios de borato de litio (Li ₂ B ₄ O ₇) a 1, 3 y 6 Gy con rayos X de alta energía.	56
Figura 5.5.1. Fading de los cristales de fluoruro de litio (LiF) a través del tiempo.	58
Figura 5.5.2. Fading de los cristales de fluoruro de calcio (CaF ₂) a través del tiempo.	59
Figura 5.5.3. Fading de vidrios de borato de litio (Li ₂ B ₄ O ₇) a través del tiempo.	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.1. Materiales para dosímetros termoluminiscentes (TLD) y dosímetros luminiscentes ópticamente estimulados (OSLD) disponibles en el mercado, junto con ejemplos de nombres comerciales, densidad ρ , número atómico efectivo Z_{eff} , temperatura del pico.....	23
Tabla 4.5.1. Muestras de vidrio de borato de litio dopadas con Dy^{3+} , Yb^{3+} y Cu a diferentes concentraciones.....	38
Tabla 5.2.1. Parámetros cinéticos de cristal de fluoruro de litio con cosolvente de etanol (LiF E).....	50
Tabla 5.2.2. Parámetros cinéticos de cristal de fluoruro de calcio con cosolvente de agua (CaF_2 A).....	51
Tabla 5.2.3 Parámetros cinéticos de vidrio de borato de litio dopado con tierras raras y nanopartículas de cobre (Cu_2)	52
Tabla 5.2.4. Figures of merit (FOM) de las deconvoluciones realizadas en los vidrios y matrices.	52
Tabla 5.3.1. Resultados de la prueba de reproducibilidad de los cristales de fluoruro de litio (LiF)	53
Tabla 5.3.2. Resultados de la prueba de reproducibilidad de los cristales de fluoruro de calcio (CaF_2).....	53
Tabla 5.3.3. Resultados de la prueba de reproducibilidad de los vidrios de borato de litio ($Li_2B_4O_7$).....	53
Tabla 5.4.1. Prueba de regresión lineal en cristales de LiF con sus respectivos cosolventes.	55
Tabla 5.4.2. Prueba de regresión lineal en cristales de CaF_2 con sus respectivos cosolventes.	56
Tabla 5.4.3. Prueba de regresión lineal de vidrios de $Li_2B_4O_7$ con sus respectivos dopantes.	57

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los detectores desempeñan un papel primordial en la medición de la radiación ionizante, ya sea generada de manera artificial o natural, a través de su interacción con la materia. Estos dispositivos se dividen en detectores pasivos, que no requieren electrónica para cuantificar la radiación (por ejemplo, dosímetros ópticamente estimulados o dosímetros termoluminiscentes), y detectores activos, que necesitan electrónica para realizar esta medición (como cámaras de ionización o contadores proporcionales). Los dosímetros proporcionan información esencial sobre el tipo de partícula, energía y daño biológico, siendo herramientas vitales para la determinación de la dosis impartida en un tratamiento que involucre radiación ionizante, en la protección radiológica del personal ocupacionalmente expuesto (POE) y del público en general o cualquier individuo que esté en riesgo debido a la radiación ionizante.

En este contexto, el enfoque de la presente investigación reside en caracterizar nuevos materiales para el diseño y construcción de los detectores pasivos, con especial atención a los dosímetros TL. Estos dispositivos poseen la capacidad de cuantificar la cantidad de radiación ionizante absorbida en un periodo de tiempo, valiéndose del fenómeno de la termoluminiscencia. La literatura señala que dichos dispositivos pueden ser perfeccionados mediante la incorporación de tierras raras o nanopartículas, con el propósito de aumentar su sensibilidad, reducir la incertidumbre, y lograr una mayor similitud con el tejido humano, entre otras características relevantes. Estas mejoras serán sometidas a pruebas específicas para evaluar su desempeño en una de las ramas más comunes de la Física Médica: la radioterapia. En este ámbito, se emplean radiaciones ionizantes como: fotones y electrones de altas energías dirigidos a volúmenes tumorales en pacientes, con el objetivo de preservar los órganos adyacentes de riesgos asociados al tratamiento, siendo esta área perfecta para corroborar el comportamiento de los dosímetros TL (cristales de LiF, CaF₂ y vidrios de Li₂B₄O₇ con diferentes dopantes o adiciones) en condiciones clínicas y caracterizar sus curvas de brillo, parámetros cinéticos, respuesta a diferentes dosis, para radioterapia.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el campo de la radioterapia, los dosímetros termoluminiscentes (TLD) son ampliamente utilizados para medir la dosis de radiación ionizante con alta sensibilidad y

precisión. Sin embargo, la respuesta de los dosímetros TL puede verse afectada por las propiedades del material que los compone. A pesar de la importancia de estos dosímetros en la radioterapia, existe una falta de investigación específica sobre cómo mejorar su respuesta a la radiación ionizante mediante la adición de tierras raras o la adición de nanopartículas a las matrices del dosímetro TL.

Por lo tanto, es necesario llevar a cabo una investigación exhaustiva para evaluar la respuesta de los dosímetros TL adicionados ya sea con tierras raras o nanopartículas en el contexto de la radioterapia clínica.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

Vallejo *et al.* (2016) [1] investigaron los efectos del tamaño del cristal y la concentración de plata (Ag) en la respuesta termoluminiscente de cubos de fluoruro de litio (LiF) puros y dopados con Ag. Estos cristales de LiF fueron irradiados con rayos X de baja energía. Se estudió la respuesta TL a la irradiación de rayos X para una exposición de 43 R. Los autores observaron dos efectos en la respuesta TL. El primero se refiere a una dependencia significativa de la intensidad TL con el tamaño de los cristales, siendo mayor para los cristales más pequeños en el caso del LiF puro. El segundo es que, para las muestras dopadas con Ag, la intensidad TL aumentó linealmente con la concentración de Ag. Los autores concluyeron que una combinación de ambos efectos podría producir la mejor respuesta de los dosímetros LiF. Además, podría ser interesante realizar estudios utilizando otro tipo de elementos de radiación para los dosímetros de LiF:Ag.

Vallejo *et al.* (2017) [2] analizaron la respuesta termoluminiscente y parámetros cinéticos de cristales de LiF dopados con europio (Eu^{3+}) expuestos a rayos X. Se sintetizaron cristales de LiF puros y dopados con Eu^{3+} mediante el método de coprecipitación, y se reporta sobre el efecto de la concentración de Eu^{3+} en la respuesta termoluminiscente (TL). El LiF mostró las energías características más altas y los factores de frecuencia más altos, respectivamente. Se encontró que la muestra dopada con Eu^{3+} al 1.0 mol% tenía una sensibilidad 5 veces mayor que el LiF puro. La notable sensibilidad TL a los rayos X exhibida por los cristales de LiF dopados con Eu^{3+} sintetizados sugiere que este material debe ser caracterizado a detalle antes de utilizarlo como dosímetro de radiación.

Vallejo *et al.* (2017) [3] estudiaron los efectos de la temperatura de síntesis sobre las propiedades morfológicas y luminiscentes de los cristales de fluoruro de litio. Este trabajo reporta el efecto de la temperatura en la estructura cristalina, tamaños de partículas en forma de cubo y la respuesta luminiscente. Se estudió la respuesta termoluminiscente a la irradiación de rayos X para una exposición de 43 R. Se observó una dependencia de la intensidad de TL de los cristales de fluoruro de litio con la temperatura de síntesis. El tamaño de los microcristales cúbicos se puede controlar variando la temperatura de síntesis.

Vallejo *et al.* (2017) [4] investigaron la fotoluminiscencia y termoluminiscencia de vidrios de fosfato dopados con disprosio (Dy^{3+}) y que contienen nanopartículas de plata. Los

autores reportaron la caracterización de fotoluminiscencia mediante espectros de absorción y emisión. Se estudió el efecto de la concentración de Ag en las curvas de termoluminiscencia y se estudió la TL debida a la radiación ultravioleta (UV). Las curvas de brillo mostraron una dependencia significativa de la intensidad de TL con el incremento de las nanopartículas de plata (AgNPs) en las muestras. Estos resultados demostraron que los vidrios de fosfato dopados con Dy^{3+} y que contienen AgNPs son un candidato potencial para su uso en iluminación de estado sólido y dosimetría retrospectiva.

Vallejo *et al.* (2020) [5] analizaron la contribución de nanopartículas de plata para mejorar la termoluminiscencia y la respuesta de fotoluminiscencia en vidrios de $Li_2B_4O_7$ dopados con Dy^{3+} e iterbio (Yb^{3+}). Se sintetizaron y caracterizaron matrices de vidrio de borato de litio dopadas con Dy^{3+} e Yb^{3+} , que contenían nanopartículas de plata en diferentes concentraciones. Este trabajo registró por primera vez los estudios de luminiscencia en la matriz de borato de litio dopada con Dy^{3+} e Yb^{3+} que contiene nanopartículas de plata. Se calcularon los parámetros básicos que definen el potencial de amplificación láser de las matrices de vidrio en función de la concentración de nanopartículas de plata. La respuesta de termoluminiscencia a la irradiación con UV también muestra una mejora significativa con el incremento de las nanopartículas de plata en las muestras. Los autores concluyeron que la adición de AgNPs en la matriz de $Li_2B_4O_7$ mejora la señal termoluminiscente y la señal luminiscente.

Thiyagarajan *et al.* (2020) [6] reportaron la termoluminiscencia de $Li_2B_4O_7$ dopado con Cu + PTFE (politetrafluoroetileno) recocido por grafeno expuesto a rayos X y radiación gamma. En este estudio el tetraborato de litio (LTB) fue dopado con cobre (0,1%) para mejorar las propiedades termoluminiscentes del LTB. Se utilizó una atmósfera reductora de grafeno para aumentar las vacantes de oxígeno en la estructura cristalina. Además, se estudió la respuesta TL de las pastillas de LTB: Cu PTFE (politetrafluoroetileno) con radiación y utilizando una fuente de ^{60}Co . La respuesta TL mostró un comportamiento lineal en función de la dosis de radiación. El análisis del efecto del tiempo de recocido en la curva de brillo TL se realizó variando el tiempo de 2 a 10 horas mediante irradiación con rayos X. Se estudió el efecto de la masa en la respuesta TL variando la masa de la muestra de 10 a 50 mg. A partir de varios estudios de velocidad de calentamiento, se observó que la intensidad TL aumentaba

cuando la velocidad de calentamiento se incrementaba gradualmente. Los resultados de las propiedades dosimétricas mostraron que este material podría tener buenas aplicaciones potenciales en dosimetría de radiación para tratamientos de radioterapia en el campo médico.

Oliveira *et al.* (2020) [7] realizaron un análisis sobre el cerio dopado en tetraborato de litio para dosimetría termoluminiscente. Este trabajo presenta análisis estructurales y dosimétricos preliminares de pellets de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ce}$, un material equivalente al tejido biológico, preparado mediante síntesis en estado sólido. Los análisis dosimétricos se llevaron a cabo exponiendo los pellets a una fuente beta y utilizando la técnica termoluminiscente. Los resultados mostraron que las señales termoluminiscentes de los pellets presentan una buena reproducibilidad. El pico de TL a 233 °C tiene un desvanecimiento insignificante y la respuesta dosimétrica de TL es lineal en el rango de 41 mGy a 42 Gy. Estas características indican que los pellets de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ce}$ producidos en este trabajo tienen potencial para ser utilizados como dosímetros termoluminiscentes. Estos resultados indican que tales pellets pueden utilizarse como dosímetros TL en varios procedimientos dosimétricos, como pruebas de garantía de calidad en radioterapia y diagnóstico radiológico.

Ogundare *et al.* (2021) [8] compararon las características de termoluminiscencia del $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ irradiado a dosis similares a las ambientales. En el estudio se realizaron mediciones de termoluminiscencia a diferentes dosis (0.04–7.2 mGy) y tasas de calentamiento (1–25 °C/s). Los autores concluyeron que la respuesta a la dosis del material termoluminiscente mostró una linealidad casi perfecta. La curva de brillo de termoluminiscencia del $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ está compuesta por una mezcla de picos de primer orden y de orden superior. Se observó extinción térmica de la luminiscencia en el $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ a dosis bajas consideradas en este estudio.

Bhadane *et al.* (2020) [9] investigaron la respuesta TL dependiente del tamaño de partícula del $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ para dosimetría gamma. En este estudio se preparó $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ mediante el método de molienda mecánica obteniendo un tamaño de partícula que varía desde 140 nm hasta 35 nm, y se estudiaron sus propiedades de termoluminiscencia mediante irradiación con rayos gamma de ^{60}Co . Se irradiaron partículas de $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ de diferentes tamaños con dosis desde 1 Gy hasta 20 kGy y se estudió la respectiva respuesta de termoluminiscencia. Se observó que el fósforo con un tamaño de partícula de ~65 nm mostró una respuesta lineal

en el rango de dosis de 1 Gy a 12 kGy. Estos resultados revelan que el $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ puede usarse para la medición de altas dosis de radiación gamma y dosimetría de irradiación de alimentos.

2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué características tiene la respuesta termoluminiscente de los cristales de LiF y CaF_2 , y vidrios de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ cuando se irradian con rayos X de 6 MV utilizando un acelerador clínico?

2.2. HIPÓTESIS

- **Hipótesis Alternativa (H_A):** La respuesta termoluminiscente de los cristales de LiF y CaF_2 , así como los vidrios de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, cuando se irradian con rayos X de 6 MV utilizando un acelerador clínico, exhibirán diferencias significativas en sus características de brillo, intensidad y cinética de liberación de energía en comparación con las respuestas obtenidas bajo condiciones de irradiación.
- **Hipótesis Nula (H_0):** La respuesta termoluminiscente de los cristales de LiF y CaF_2 , así como los vidrios de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, cuando se irradian con rayos X de 6 MV utilizando un acelerador clínico, no exhibirán diferencias significativas en sus características de brillo, intensidad y cinética de liberación de energía en comparación con las respuestas obtenidas bajo condiciones de irradiación.

2.3. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

- **Objetivo general:**

Caracterizar la respuesta termoluminiscente de los cristales de LiF y CaF_2 , y vidrios de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ irradiados con rayos X de 6 MV utilizando un acelerador clínico.
- **Objetivos específicos:**
 - Irradiar los cristales de LiF y CaF_2 , y vidrios de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ con rayos X de 6 MV de un acelerador clínico.
 - Medir la respuesta termoluminiscente de los cristales de LiF y CaF_2 , y vidrios de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.
 - Analizar la respuesta termoluminiscente de los cristales de LiF y CaF_2 , y vidrios de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

La radioterapia consiste en el uso de radiaciones ionizantes de alta energía (>1.25 MV) para el tratamiento de patologías oncológicas, algunos desordenes funcionales, como neuralgia del trigémino, y tratamientos especiales, como irradiación a cuerpo entero. El objetivo de un tratamiento de radioterapia es proporcionar una dosis máxima y uniforme al volumen blanco (volumen a tratar) y una dosis mínima para el tejido normal y órganos de riesgo (OAR's) [10]. Por lo tanto, en un tratamiento de radioterapia se busca obtener efectos deterministas, a través de la muerte celular como consecuencia del daño letal ocasionado por la radiación ionizante al ADN [11]. En consecuencia, la medición de la dosis absorbida, tanto en el volumen blanco como en el tejido sano y los OAR's, se convierte en una tarea de gran importancia para el Físico Médico Clínico.

La dosimetría de las radiaciones ionizantes consiste en medir la cantidad de dosis absorbida por un material o tejido que ha sido expuesto a radiación ionizante. La dosis absorbida es una magnitud dosimétrica que se mide de manera indirecta, para lo cual se requiere de un dosímetro. Un dosímetro será cualquier dispositivo, instrumento o aparato que posee una propiedad física dependiente de la dosis. En dosimetría clínica disponemos de una variedad de dosímetros, por ejemplo, las cámaras de ionización, las películas radiocrómicas y los dosímetros luminiscentes, cuya respuesta a la radiación ionizante es la ionización, la absorbancia y la luminiscencia, respectivamente [10]. Dentro de los dosímetros luminiscentes tenemos los ópticamente estimulados (OSL) y los dosímetros termoluminiscentes (TLD) [12].

3.1. DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE

La dosimetría de luminiscencia es la medición de la dosis absorbida de la radiación ionizante basada en la emisión de fotones visibles por material termoluminiscente. La dosimetría de luminiscencia puede referirse a la termoluminiscencia (TL), la luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) u otros tipos de procesos de emisión de fotones, incluidos la radiofotoluminiscencia, la radioluminiscencia y el centelleo [12]. Los dosímetros TL cuantifican la cantidad de radiación en cierto periodo de tiempo mediante el fenómeno de la termoluminiscencia.

Los dosímetros TL son adecuados para la dosimetría en general, en entornos de radioterapia, medicina nuclear e investigación. Los dosímetros comerciales están diseñados de diferentes elementos y concentraciones que permiten detectar diferentes tipos de radiaciones (Rayos X de alta y baja energía, alfas, betas, neutrones térmicos y rápidos, etc.). Una desventaja de los dosímetros TL es que sus propiedades dependen de los defectos que contienen los cristales o vidrios, es decir, en un cristal o vidrio real, las trampas o huecos definen aspectos como la sensibilidad, respuesta energética y su linealidad de detección. La respuesta de los TL depende de la forma de su cristal o vidrio, su forma de producción, entre otras. Esto se puede apreciar cuando se comparan las respuestas de un TLD-100 con un TLD-700 [13].

La **Tabla 3.1.1** muestra ejemplos de algunos dosímetros comerciales, sus composiciones, nombre comercial, densidad, número atómico efectivo, curvas de brillo, longitud de onda de emisión, entre otras. Que se deben tomar en cuenta para seleccionar cual es el mejor dosímetro según la aplicación que se le dé.

Tabla 3.1.1. Materiales para dosímetros termoluminiscentes (TLD) y dosímetros luminiscentes ópticamente estimulados (OSLD) disponibles en el mercado, junto con ejemplos de nombres comerciales, densidad ρ , número atómico efectivo Z_{eff} , temperatura del pico [12].

	Commercial names ^a	ρ (g/cm ³)	Z_{eff}^b	Main glow peak temp ^c (°C)	Emission ^d (nm)	TL sensitivity vs. LiF	k_Q 30 keV/ ⁶⁰ Co	Fading of dosimetry peak at normal temp
LiF:Mg,Ti (TL)	TLD-100	2.6	8.31	~235	~410	Referent	1.3	5% in 3–12 months
⁶ LiF:Mg,Ti (TL)	TLD-600	2.6	8.31	~235	~410	1.0	1.3	5% in 3–12 months
⁷ LiF:Mg,Ti (TL)	TLD-700	2.6	8.31	~235	~410	1.0	1.3	5% in 3–12 months
LiF:Mg,Cu,P (TL)	TLD-100H	2.5	8.31	~200	~370	30	1.25	2% in 3 months
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn (TL)	TLD-800	2.3	7.32	~185	~600	0.3	0.9	5–10% in 3 months
CaF ₂ :Dy (TL)	TLD-200	3.18	16.90	~160, 185, 245, 290	480, 575, 660, 750	30	14	25% in 4 week
CaF ₂ :Mn (TL)	TLD-400	3.18	16.90	~300	~495	10	14	15% in 2–4 week
CaSO ₄ :Dy (TL)	TLD-900	2.61	15.62	~220	480, 575, 660, 750	15	12	6% in 6 months
Al ₂ O ₃ :C (OSL)	nanoDot TM	3.95 ^e	11.28	~200	~410	N/A	3.7	4% in 3 months
BeO (OSL)	Thermalox 995	2.85	7.21	~210, 330	~335 (TL), ~390 (OSL)	N/A	0.82	5–10% in 3 months

3.2. FENÓMENO DE TERMOLUMINISCENCIA

La termoluminiscencia, o emisión de luz estimulada por la temperatura después de la eliminación de la excitación, es un caso de fosforescencia observada en condiciones de aumento de temperatura gradual. En los experimentos de termoluminiscencia habituales, un sistema se irradia a una temperatura a la que la intensidad de fosforescencia es baja, y luego se calienta a través de un rango de temperatura en el que la intensidad de fosforescencia es alta, hasta un nivel de temperatura en el que todas las cargas han sido excitadas térmicamente fuera de sus niveles metaestables y la luminiscencia desaparece por completo. Si la intensidad

de la luz emitida por el material se representa como una función de la temperatura (o del tiempo), el gráfico resultante se denomina curva de brillo. Las curvas de brillo tienen máximos llamados picos de brillo y son función de las diversas trampas de niveles de energía.

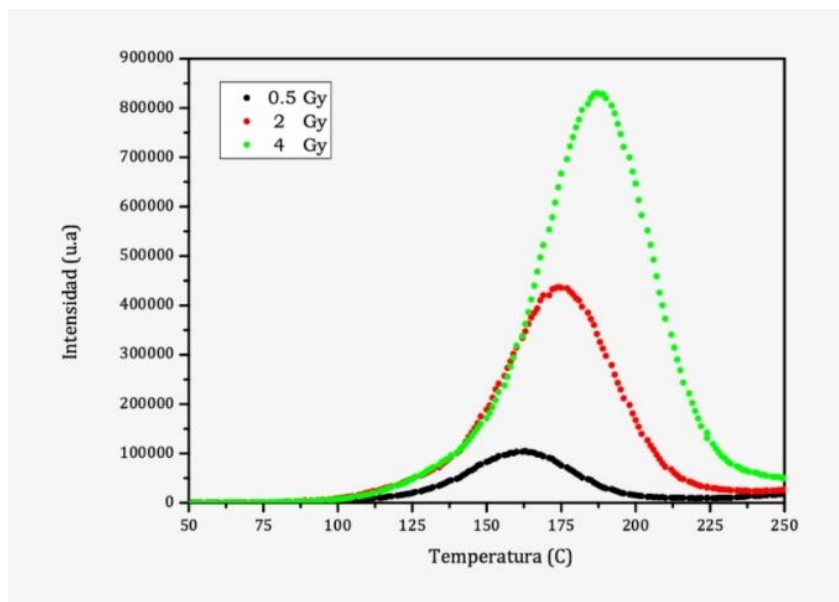


Figura 3.2.1. Ejemplo de curva de brillo. Cada pico corresponde a una trampa bien definida [13].

Durante la irradiación, el material se expone a radiación ionizante, como rayos X, rayos gamma o partículas alfa. Esta radiación puede causar que los electrones se separen de sus átomos, formando electrones libres y huecos. Los electrones libres son partículas con carga negativa que pueden moverse libremente a través del material. Los huecos son espacios vacíos en la banda de valencia que pueden ser ocupados por electrones.

Los electrones libres y los huecos pueden recombinarse, lo que significa que un electrón libre puede ocupar un hueco. Esta recombinación puede ocurrir de dos maneras:

- **Radiativa:** El electrón libre cede su energía al material, emitiendo luz.
- **No radiativa:** El electrón libre cede su energía a otro electrón o a una vibración atómica.

Los electrones libres atrapados en un centro luminiscente pueden liberarse cuando el material se calienta. Cuando se calienta el material, los electrones libres pueden recombinarse con huecos, emitiendo luz. El electrón puede permanecer en el nivel metaestable durante mucho tiempo si la energía de separación E entre los niveles metaestables es tal que $E \gg$

kT , donde k es la constante de Boltzmann ($k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) y T es la temperatura. Suponiendo que la distribución de energía es maxwelliana, la probabilidad por unidad de tiempo P de que un electrón escape del nivel (trampa) a una temperatura dada se rige por la siguiente ecuación:

$$P = s e^{-\frac{E}{kT}} \quad (3.1)$$

donde:

E = Profundidad de la trampa (eV)

k = Constante de Boltzman

T = Temperatura absoluta (K)

donde **s** es el factor de frecuencia, cuyo valor se encuentra entre 10^{12} y 10^{14} s^{-1} y está relacionado con el número de veces que el electrón interactúa en la red cristalina por segundo.

El cristal se somete normalmente a un calentamiento del tipo:

$$T(t) = T_0 + \beta t \quad (3.2)$$

donde T_0 es la temperatura inicial y β es la velocidad de calentamiento constante, es decir, la temperatura del cristal aumenta a una velocidad constante de β grados por unidad de tiempo. Combinando las ecuaciones 3.1 y 3.2 obtenemos la siguiente ecuación:

$$n(t) = n \exp \left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^{T(t)} e^{-\frac{E}{k\theta}} d\theta \right] \quad (3.3)$$

donde θ es una variable temporal y desaparece tras la integración. Suponiendo que la intensidad luminosa es proporcional a la tasa de electrones que se liberan (cantidad de electrones libres que se liberan de un material a medida que se calienta), la intensidad TL puede describirse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{TL} \propto \left| \frac{dn}{dt} \right| = n(t) = n \exp \left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^{T(t)} e^{-\frac{E}{k\theta}} d\theta \right] \quad (3.4)$$

La medición de la intensidad de la luz emitida por el material durante el calentamiento controlado constituye la curva de emisión TL (curva de brillo). Esta curva, proporciona la intensidad termoluminiscente del material en función de la temperatura o del tiempo [14].

En general, una curva de brillo termoluminiscente presenta varios picos, E es la diferencia de energía entre el estado excitado y el estado metaestable, o profundidad de la trampa. Esta trampa puede ser tanto una trampa de electrones como una de vacancias, y se caracteriza por la temperatura en la que se produce el máximo de emisión. Cada material tiene una curva de brillo característica debido a que los picos están relacionados con los centros de color, que son defectos en la estructura cristalina de un material que pueden atrapar electrones. Cuando un electrón es atrapado en un centro de emisión, puede liberarse emitiendo luz. La existencia de centros de color depende de la presencia de defectos puntuales en la estructura cristalina del material. La presencia de más de un pico indica que el cristal tiene más de un tipo de trampa [13,14].

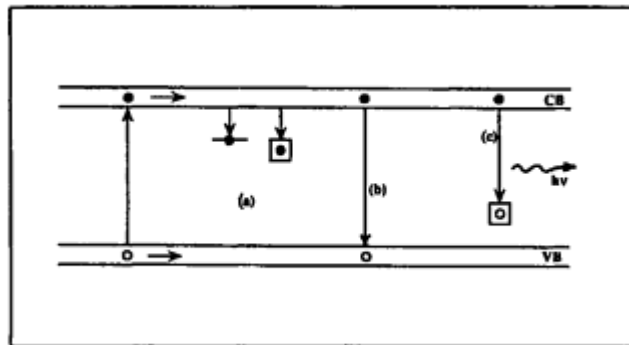


Figura 3.2.2. Procesos producidos en la estructura cristalina por irradiación [13].

3.3. CRISTALES DE LiF

El fluoruro de litio (LiF) es el cristal más popular y estandarizado de los TLD, debido a sus características favorables en la cuantificación de la radiación, como son la respuesta lineal de dosis (hasta 1 Gy), estabilidad en la respuesta de la dosis, equivalencia tisular fotónica o número atómico efectivo ($Z_{ef} \approx 8.4$) y la no sensibilidad a la luz. Una ventaja adicional del LiF sobre otros materiales dosimétricos es la facilidad de su síntesis [15,16].

Este material se ha convertido en el más utilizado en dosimetría de radiación con fines clínicos. Numerosas publicaciones han reportado la respuesta del LiF en diversos campos de radiación y una amplia gama de dosis, así como el efecto de los diferentes elementos utilizados como dopantes, el ejemplo más popular de estos cristales es el dosímetro comercial TDL-100 (LiF: Mg, Cu, P) [1,13,17].

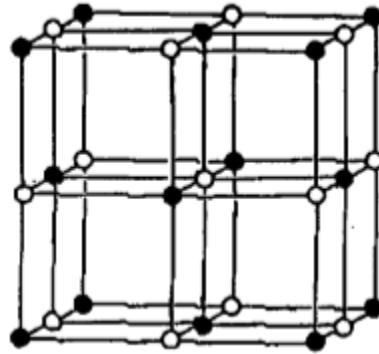


Figura 3.3.1. Estructura tridimensional de un cristal de LiF [13].

3.4. CRISTALES DE CaF_2

La fluorita (CaF_2) es un mineral que se encuentra con frecuencia en diversos tipos de depósitos minerales, principalmente en aquellos de origen hidrotermal, pero también puede originarse en rocas pegmatitas y magmáticas. Se utiliza en una amplia variedad de procesos químicos, metalúrgicos y cerámicos, siendo la principal fuente comercial de flúor.

La fluorita se encuentra de forma natural en una amplia gama de colores, como amarillo, azul, verde, violeta, morado, negro azulado, marrón, incoloro, ocasionalmente rosa y rojo, y a veces con iridiscencia. Además, su marcada fluorescencia le ha dado nombre al fenómeno.

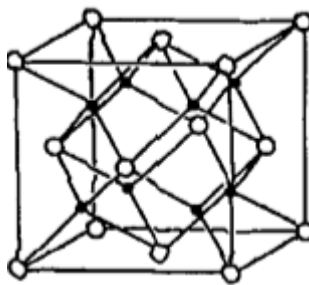


Figura 3.4.1 Estructura tridimensional de un cristal de CaF_2 [13].

El CaF_2 ha sido objeto de investigación para su aplicación en dosimetría individual, ambiental y medicina nuclear. En este caso el $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ comercial (TLD-200TM) muestra una sensibilidad 30 veces mayor para rayos γ en comparación con el $\text{LiF}:\text{Mg, Ti}$ (TLD-100TM). Sin embargo, el CaF_2 presenta algunas desventajas como son el fading anómalo, problemas en la reproducibilidad de los lotes, una curva TL compleja y un alto número atómico efectivo ($Z_{ef} \approx 17$) en comparación con el tejido humano ($Z_{ef} = 7.4$) [14].

3.5. VIDRIOS DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$

El borato de litio (LTB; $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) es uno de los materiales más populares para su uso en aplicaciones médicas como dosímetro TL. El LTB se ha preparado mediante numerosas técnicas, como la formación de cristales y vidrios. Aunque existen varios TLD disponibles en el mercado, aún falta la disponibilidad de TLD's equivalentes a tejido, lo cual es un requisito fundamental al considerar la dosimetría personal. Entre los diversos TLDs, el tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) está despertando un fuerte interés en este campo de la dosimetría debido a sus buenas características, como la equivalencia a tejido ($Z_{ef} \approx 7.3$), la posibilidad de utilizar ^6Li y ^{10}B en su estructura, lo que aumenta su sección transversal para neutrones térmicos, y su amplio intervalo de banda óptica ($E_g = 9 \text{ eV}$), que proporciona una amplia ventana transparente para la absorción y emisión de fotones debido a diferentes dopantes.

Además, el $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ tiene una composición no higroscópica y es altamente sensible a la radiación ionizante. Informes recientes han demostrado que $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ tiene una sensibilidad similar al TLD-100. También presenta un amplio rango lineal de dosis de TL respuesta (hasta 102 Gy) y el límite más bajo de dosis detectable (LDD, por sus siglas en inglés) de $10 \mu\text{Gy}$ cuando se irradia con una fuente beta. El $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ también tiene una amplia aplicación en aparatos de ondas acústicas de superficie y en tecnología láser debido a sus propiedades ópticas no lineales.

Aunque $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ se está estudiando ampliamente para su uso como TLD, todavía se están realizando grandes esfuerzos en la comunidad de dosimetría de radiación de todo el mundo para desarrollar nuevas combinaciones de matriz huésped y dopante iónico y/o co-dopantes con el fin de mejorar las propiedades dosimétricas de este material, que puede ser

representado por su sensibilidad TL, reproducibilidad, niveles de dosis de detección más bajos y estabilidad de la señal [6].

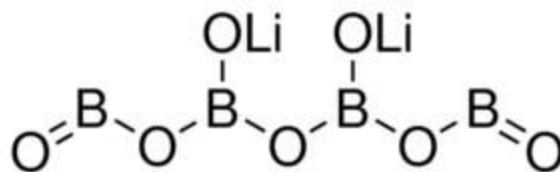


Figura 3.5.1. Estructura química del borato de litio $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1. INFRESTRUCTURA Y APOYO TÉCNICO DISPONIBLE

La síntesis de las matrices se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Física de la **Universidad de Guanajuato, Campus León**, bajo la supervisión del **Dr. en C.S. Miguel Ángel Vallejo Hernández**, el **M. en C.S. Manuel Iván León Madrid** y el **M. en C.S. José Noé Zavala Cuellar**. La irradiación de las matrices se llevó a cabo en el Departamento de Radioncología del **Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Dr. Salvador Zubirán”**, con la ayuda de los físicos médicos **M. en C.S. Roberto Carlos Ronquillo Gómez** y **M. en C.S. Alfredo Ortega**, y los técnicos en radioterapia **Stephany Gavia Rivas** y **Marco Antonio Varela**. La lectura de las matrices se realizó en el laboratorio de la **Facultad de Ingeniería Física del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Legaría** del Instituto Politécnico Nacional con la ayuda del **Dr. en C.S. Teodoro Rivera Montalvo** y el **M. en C.S. Daniel Nolasco Altamirano**, junto con la asesoría metodológica llevada a cabo por la **Dra. en C.S. Elsa Yazmín León Marroquín** del **Departamento de Física de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa**.

4.2. MATERIALES Y EQUIPO

4.2.1. Acelerador lineal Varian TrueBeam



Figura 4.2.1.1. Acelerador lineal Varian TrueBeam.

La irradiación de las matrices se realizó con un acelerador lineal clínico (LINAC) de la marca Varian TrueBeam (Varian Medical Systems, Inc., Palo Alto, CA, USA)

operando en modo de fotones con una energía de 6 MV (ver figura 7). El LINAC es propiedad del Departamento de Radioterapia del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Dr. Salvador Zubirán”.

4.2.2. Maniquí de agua sólida Plastic Water® DT - 50 keV - 15 MeV

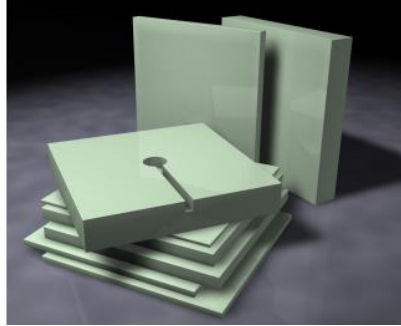


Figura 4.2.2.1. Maniquí de agua sólida Plastic Water®.

Los dosímetros se colocaron en un maniquí de agua sólida Plastic Water (PTW, Freiburg, Germany). El maniquí de 30 x 30 x 30 cm³ está compuesto por placas de 30 x 30 cm² de área y diferentes espesores como se muestra en la figura 8. Los espesores de las placas son de 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 5.0 cm. El maniquí es propiedad del Departamento de Radioterapia del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Dr. Salvador Zubirán”.

4.2.3. Matrices de cristales de LiF, CaF₂ y vidrios de Li₂B₄O₇



Figura 4.2.3.1. Matrices de LiF, CaF₂ and Li₂B₄O₇

Los matrices de cristales de LiF y CaF₂, y de vidrios de Li₂B₄O₇ (ver figura 4.2.3.1) caracterizados en este trabajo son propiedad del laboratorio de ingeniería física de la universidad de Guanajuato, campus León. Se utilizaron matrices con diferentes dopantes y diferentes concentraciones.

4.2.4. Lexsyg Smart Freiberg Instruments



Figura 4.2.4.1. Lexsyg smart Freiberg Instruments.

El Lexsygsmart (ver figura 4.2.4.1) es un lector de luminiscencia compacto, rentable y capaz de realizar investigaciones para mediciones de rutina estándar de luminiscencia utilizando TL y OSL (estimulación térmica y óptica). El equipo es propiedad laboratorio de dosimetría del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Legaría del Instituto Politécnico Nacional.

Principales partes del lector automatizado lexsygsmart TL/OSL incluyen:

1. Unidad de calentamiento.
2. Unidad de estimulación óptica.
3. Unidad de detección.
4. Carrusel de filtros ópticos (opcional, pero recomendada).
5. Unidad de irradiación beta.

Referente a la unidad de calentamiento, la termoluminiscencia (TL), el precalentamiento (PH) de materiales o las mediciones a temperaturas elevadas (por ejemplo, el protocolo estándar de SAR de cuarzo) requieren condiciones de calentamiento precisas y exactas mediante un elemento calefactor. Las mediciones son posibles durante cualquier parte de un ciclo de calentamiento/enfriamiento, que puede ser simplemente una rampa de calentamiento, pero también es posible una serie de varios pasos de calentamiento y etapas de temperatura.

- **Rango de temperatura:** desde la temperatura ambiente (TA) hasta 500°C (710°C disponible bajo solicitud especial).

- **Tasa de calentamiento:** 0.1 - 20.0 K/s (@ T_{max} = 500 °C); 0.1 - 10.0 K/s (@ T_{max} = 710 °C).
- **Programación altamente flexible:** programación en pasos de los ciclos de calentamiento y enfriamiento dentro de los parámetros del sistema (es decir, temperatura y tasas de calentamiento/enfriamiento).
- **Opciones de software:** para un mayor control de la temperatura.

En las unidades de detección, el dispositivo lexsygart puede estar equipado con una unidad de detección (PMT UV-VIS básica o PMT UV-VIS extendida).

PMT UV-VIS Básica

- **Aplicaciones estándar:** ideal para aplicaciones estándar en datación por luminiscencia y dosimetría.
- **Unidad de detección:** con PMT de cátodo bi-alcalino estándar (HAMAMATSU).
- **Sensibilidad:** 280-650 nm.
- **Sensibilidad máxima:** 420 nm (3.1 E5 recuentos s⁻¹ pW⁻¹).
- **Recuentos oscuros típicos:** 100 cps.
- **Contador de fotones:**
- **Linealidad de recuento (pulsos aleatorios, 10% de pérdida):** 6.0 E6 cps.
- **Óptica UV-VIS.**

Estas son algunas de las características con las que cuenta el dispositivo, para más información consultar el manual [18].

4.2.5. Software ORIGIN PRO-2016

Los datos de lectura obtenidos del Lexsyg Smart fueron procesados y analizados utilizando el software Origin versión 2016. Este software es una herramienta poderosa para el análisis de datos y la creación de gráficos científicos, ampliamente utilizado en diversas disciplinas de investigación debido a su versatilidad y funcionalidad avanzada. Destacando en el análisis de las curvas de brillo, su precisión y detalle, visualización clara

y efectiva, y la integración. Siendo este software óptimo para el procesamiento de los datos.

4.2.6. Software TLAnal

Finalmente, el análisis detallado de las curvas de brillo termoluminiscentes (TL) se llevó a cabo utilizando el software TLAnal. Este software especializado es una herramienta potente para el análisis de datos TL, ampliamente utilizado en la investigación de materiales termoluminiscentes debido a su capacidad para realizar deconvolución de curvas y determinar parámetros cinéticos con alta precisión. El software, al ser especializado en el análisis de estos materiales, ofrece herramientas como: Importación de datos de las curvas de brillo, deconvolución de las curvas de brillo, ajustar los modelos cinéticos que sean óptimos para tus curvas de brillo y análisis comparativo entre las curvas calculadas y experimentales [32,33]

4.3. SÍNTESIS DE CRISTALES DE LiF

Para la síntesis de los cristales de LiF, basándonos en el estudio realizado por Zavala *et al.* (2021) [19], se investigó la influencia del solvente en la síntesis de cristales de LiF mediante el método de precipitación y cómo esta influencia afecta sus propiedades termoluminiscentes (TL). En dicho estudio, se evaluaron diferentes alcoholes como cosolventes para generar diversos defectos en la estructura cristalina, tales como vacancias o intersticios. Todos los cristales fueron irradiados utilizando una fuente de cobalto-60.

En la Figura 4.3.1. las imágenes SEM permiten observar la morfología superficial de los cristales sintetizados. En ellas se aprecia una distribución uniforme de partículas con tamaños que varían entre [0.04 μm a 35.26 μm para los policristales, y el tamaño calculado de los cristales fue de 63 nm a 82 nm]. Este análisis es crucial, ya que la morfología y el tamaño de las partículas pueden influir significativamente en las propiedades termoluminiscentes del material, debido a que la relación superficie-volumen afecta la densidad de trampas electrónicas activas. Además, el tipo de alcohol usado en la síntesis influyó en la generación de centros de color tipo F.

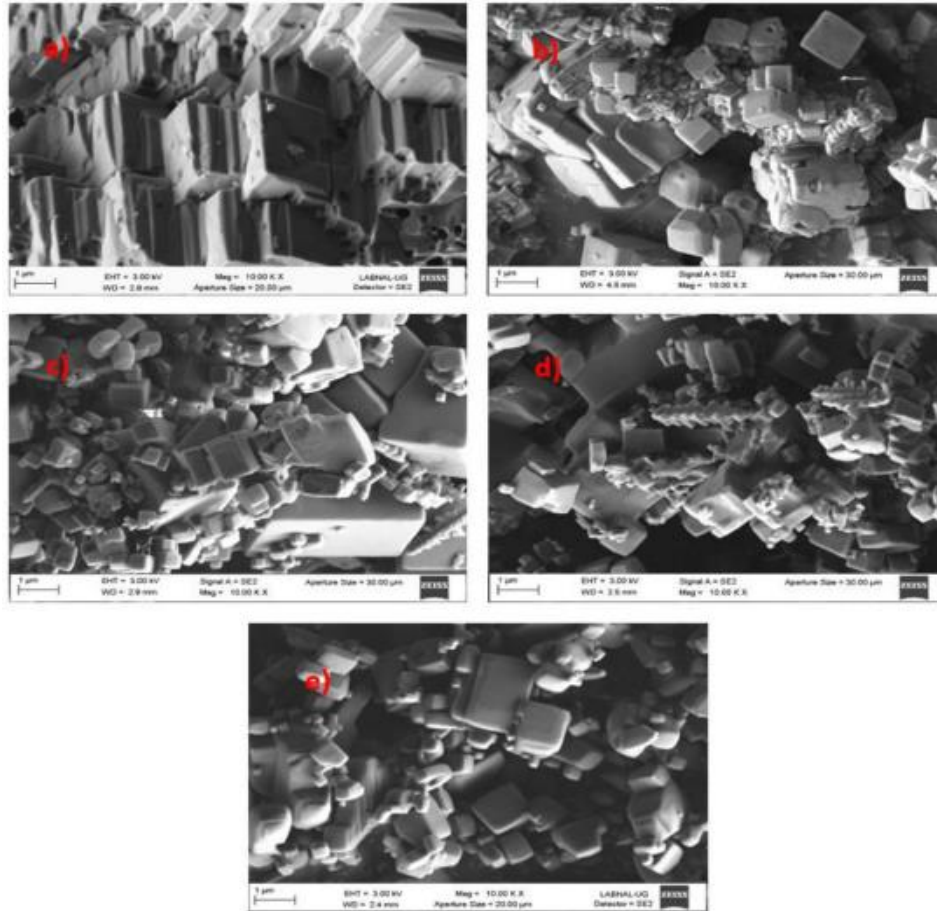


Figura 4.3.1. *Imágenes SEM de los cristales de LiF sintetizados utilizando diferentes alcoholes como cosolventes [19].*

La Figura 4.3.2. muestra el patrón de difracción de rayos X (XDR, por sus siglas en inglés) confirma la estructura cristalina del LiF dopado. Los picos observados en la difracción corresponden a las posiciones esperadas para la estructura cúbica del LiF, con una buena concordancia con los valores teóricos obtenidos de la base de datos de difracción.

Estos resultados demuestran que la elección del cosolvente tiene un impacto significativo en las características termoluminiscentes de los cristales de LiF, lo cual es crucial para optimizar sus aplicaciones en dosimetría de radiación [19].

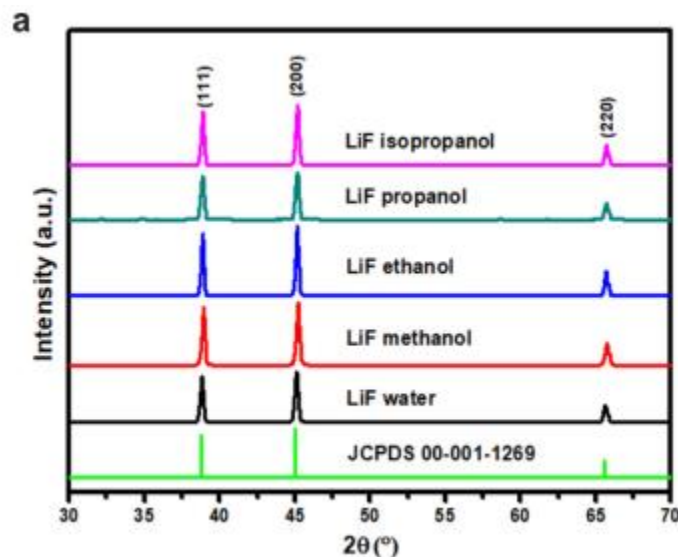


Figura 4.3.2. Patrón de difracción de rayos X de los cristales de LiF [19].

4.4. SÍNTESIS DE CRISTALES DE CaF_2

La síntesis de nanopartículas de fluoruro de calcio dopadas con erbio se llevó a cabo mediante un método de coprecipitación química, siguiendo el procedimiento descrito por Vu Thi Thai Ha *et al.* (2022) [20]. En este proceso, se utilizó una solución de agua y etanol en una proporción de 1:1 como solvente. La elección de este cosolvente fue crucial para controlar tanto la morfología como el tamaño de las nanopartículas obtenidas.

Para la síntesis, se disolvió una cantidad determinada de nitrato de calcio y cloruro de erbio en la mezcla de solventes, seguido de la adición de una solución de fluoruro de sodio bajo agitación constante. La reacción se llevó a cabo a temperatura ambiente y se dejó en agitación durante varias horas para asegurar una precipitación completa y homogénea del fluoruro de calcio dopado. Posteriormente, el precipitado se lavó repetidamente con agua destilada y etanol para eliminar los iones residuales y se secó a 60 °C.

Los cristales de CaF_2 formados, fueron caracterizados mediante técnicas de difracción de XDR (ver Figura 4.4.1) y microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) (ver Figura 4.4.2). Los resultados de XRD confirmaron la estructura cúbica de los cristales, con un tamaño de grano principal calculado mediante la fórmula de Scherrer de aproximadamente 30 nm. Las imágenes de SEM revelaron una morfología cúbica

característica de los cristales de CaF_2 , evidenciando la alta calidad y uniformidad de las nanopartículas sintetizadas.

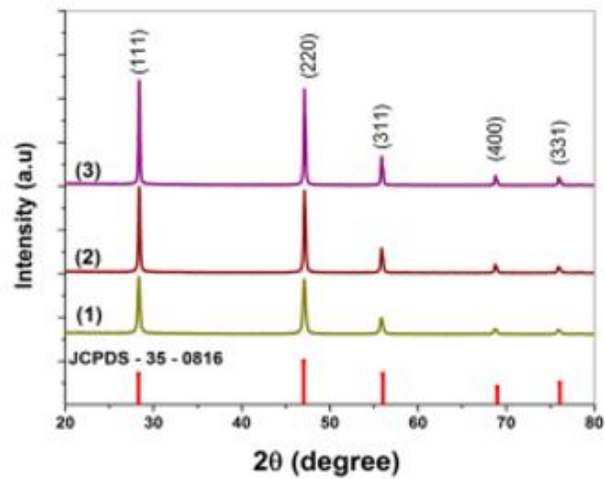


Figura 4.4.1. Patrón de difracción de rayos X de cristales de CaF_2 [20].

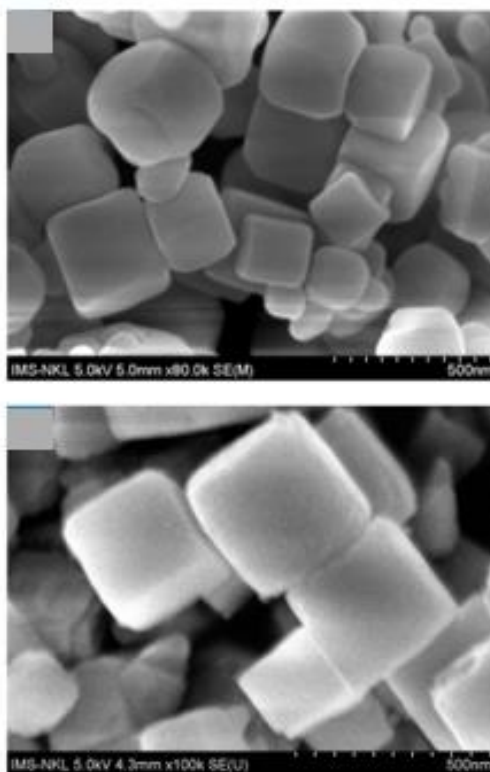


Figura 4.4.2. Imágenes SEM de los cristales de CaF_2 sintetizados [20].

Las propiedades termoluminiscentes (TL) del CaF_2 también fueron evaluadas. Los experimentos mostraron que los nanocristales exhibían una alta sensibilidad TL y una

respuesta lineal a dosis de radiación beta. El pico principal de TL se localizó a 235°C (508 K), y los parámetros cinéticos correspondientes a la trampa de carga se determinaron utilizando el software TLAnal. Estos parámetros incluyen la energía de activación y el factor de frecuencia, esenciales para comprender el comportamiento TL del material.

La síntesis de cristales de CaF₂ dopados con Er³⁺ mediante el método de coprecipitación química, utilizando una solución de agua y etanol, ha permitido obtener nanopartículas que muestran una estructura cristalina adecuada para posteriores análisis. Se evaluarán sus propiedades ópticas y termoluminiscentes con el fin de determinar su potencial en aplicaciones como la dosimetría de radiación y otras tecnologías lumínicas avanzadas. Los resultados de estas caracterizaciones se discutirán en las siguientes secciones para verificar la idoneidad de los nanomateriales de CaF₂ en aplicaciones de radioterapia. [20].

4.5. SÍNTESIS DE VIDRIOS DE Li₂B₄O₇

De acuerdo con Toscano *et al.* (2024), la síntesis de matrices de tetraborato de litio (Li₂B₄O₇) dopadas con disprosio (Dy³⁺) e iterbio (Yb³⁺) y conteniendo nanopartículas de cobre (Cu) se realizó mediante la técnica de fusión y temple. Para llevar a cabo este proceso, se utilizaron tetraborato de litio (Li₂B₄O₇), óxido de disprosio (Dy₂O₃), óxido de iterbio (Yb₂O₃) y nitrato de cobre (Cu (NO₃)₂) como reactivos. Las muestras de matriz de vidrio de borato de litio dopadas con Dy³⁺, Yb³⁺ y Cu se prepararon con el método “melt-quenching”, y los vidrios se cortaron y pulieron en discos de 6 mm de radio con 2 mm de altura para su posterior caracterización.

Tabla 4.5.1. Muestras de vidrio de borato de litio dopadas con Dy³⁺, Yb³⁺ y Cu a diferentes concentraciones [21].

Sample Code	Li ₂ B ₄ O ₇ (Mol %)	Dy (NO ₃) ₃ (Mol %)	Yb (NO ₃) ₃ (Mol %)	CuCl (Mol %)
A (Cu1)	99.9	0.5	0.5	0.00
B (Cu2)	98.98	0.5	0.5	0.02
C (Cu3)	98.96	0.5	0.5	0.04
D (Cu4)	98.94	0.5	0.5	0.06
E (Cu5)	98.92	0.5	0.5	0.08

Los vidrios sintetizados se caracterizaron utilizando diversas técnicas. La difracción de rayos X confirmó la estructura amorfa de los vidrios mediante la ausencia de picos cristalinos en los patrones de difracción. La microscopía electrónica de barrido permitió visualizar la distribución y el tamaño de las nanopartículas de cobre, que mostraron tamaños promedio de 5-15 nm. La espectroscopía UV-Vis se utilizó para evaluar las propiedades ópticas del vidrio, identificando las bandas de absorción características de los dopantes Dy^{3+} y Yb^{3+} , así como las nanopartículas de cobre. La espectroscopía de fotoluminiscencia (PL) analizó las emisiones lumínicas bajo diferentes excitaciones, revelando emisiones intensas en las regiones azul y amarillas correspondientes a Dy^{3+} y Yb^{3+} .

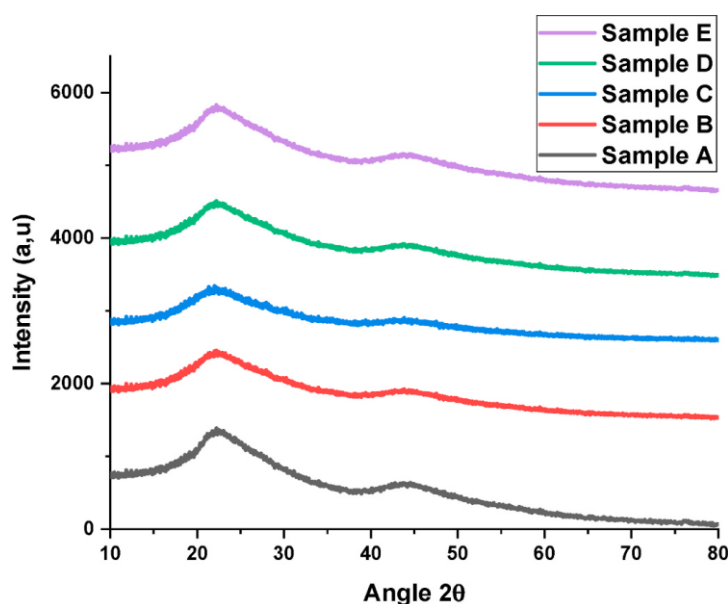


Figura 4.5.1. Difracción de RX de las muestras [21].

Las propiedades de termoluminiscencia de los vidrios se evaluaron mediante la determinación de varios parámetros. El análisis de la termoluminiscencia mostró un incremento significativo en la respuesta TL con la adición de nanopartículas de cobre. La intensidad de la emisión TL se incrementó considerablemente debido a la presencia de las nanopartículas, lo que sugiere una mejora en la eficiencia de trampa y liberación de electrones en los materiales dopados.

La síntesis de matrices de tetraborato de litio dopadas con Dy^{3+} y Yb^{3+} , y que contienen nanopartículas de cobre, resultó en la obtención de vidrios que serán caracterizados para evaluar sus propiedades ópticas y de termoluminiscencia. A través de la difracción de

rayos X, se analizó la estructura cristalina del material, mientras que las mediciones termoluminiscentes ayudarán a determinar su respuesta ante la radiación. Estas caracterizaciones permitirán evaluar el potencial de estos materiales en aplicaciones como protección contra radiación en ambientes médicos y nucleares. Los resultados de estas evaluaciones se discutirán en las siguientes secciones [21].

4.6. CONDICIONES DE IRRADIACIÓN

Para la irradiación se utilizó el LINAC VARIAN TrueBeam del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Dr. Salvador Zubirán” del departamento de radioncología. La figura 4.6.1. muestra el esquema experimental:

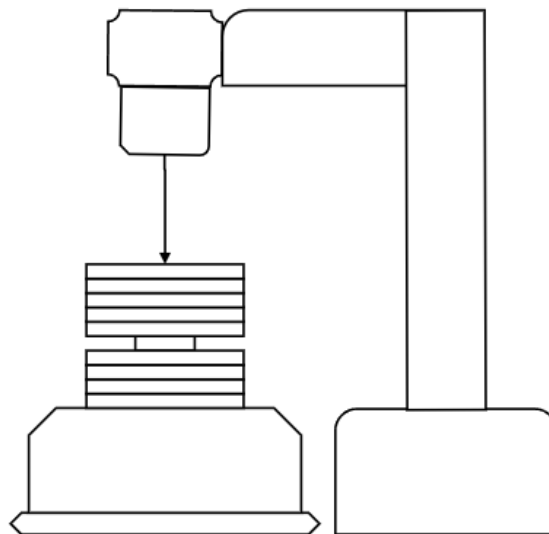


Figura 4.6.1. Esquema experimental de la irradiación de las matrices.

Las matrices se colocaron en los portadosímetros (ver figura 4.6.2) diseñados por la Universidad de Guanajuato, Campus León. En ellas se colocaron los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇ para realizar las irradiaciones dentro del campo de radiación del LINAC.



Figura 4.6.2. Colocación de matrices en los portadosímetros en el campo.

Las condiciones para las irradiaciones fueron: Distancia Fuente-Superficie (SSD, por sus siglas en inglés) de 100 cm, tamaño de campo de 10 x10 cm², gantry posicionado a 0°, en modo fotones de 6 MV de energía, a una dosis de 3 Gy con una tasa de dosis de 600 UM/min (Unidades monitor/minuto) y una cámara de ionización para la dosimetría de referencia. Como se puede apreciar en la **Figura 4.6.3** las matrices se colocaron entre las placas de agua sólida para alcanzar equilibrio de partícula cargada (1 UM/1 cGy), en ese punto y la dosis coincidiera con las unidades monitor administradas, basándonos en los parámetros del documento **TRS-398 de la IAEA titulado: “DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ABSORBIDA EN RADIOTERAPIA CON HACES EXTERNOS”**.

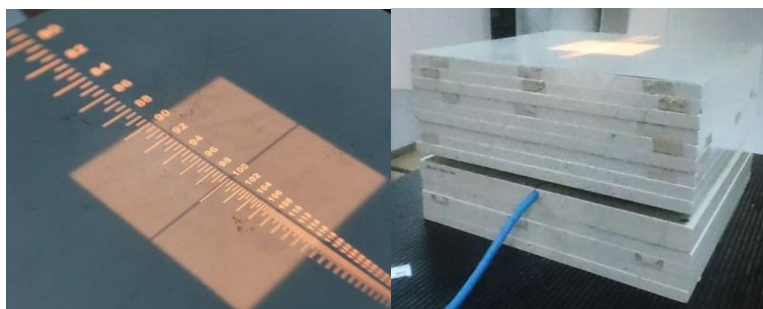


Figura 4.6.3. SSD a 100cm y colocación de placas para la irradiación de las matrices.

4.7. LECTURA DE LAS MATRICES

Las muestras se leyeron en un intervalo promedio de tiempo de 2 horas y 30 minutos postirradiación, con el fin de obtener la mayor cantidad de datos de intensidad termoluminiscente (TL intensity), usando el Lexsyg Smart de Freiberg Instruments ubicado en el laboratorio de termoluminiscencia del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), unidad Legaría.



Figura 4.7.1. Lector de termoluminiscencia Lexsyg Smart ubicado en CICTACTA.

En las condiciones de lectura se determinó una rampa de calentamiento que va desde los 25° a 400° grados Celsius, con una tasa de calentamiento de 10 C/s, estas matrices irradiadas se colocaron en la porta muestras (Como se aprecia en la **Figura 4.7.2**) del Lexsyg Smart, enseguida se realizaron 2 lecturas por muestra, la primera de ellas para obtener las curvas de brillo (L_1) y la segunda como fondo (L_2), para así restar ambas lecturas ($L_N = L_1 - L_2$) y obtener la señal pura sin verse afectada por el fondo.



Figura 4.7.2. Porta muestra del Lexsyg Smart donde se ubicaron los vidrios y cristales.

4.8. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA TL

Para la caracterización de la respuesta termoluminiscente (TL) de los materiales estudiados, se siguió la metodología descrita en la tesis de Lozano Rojas (2011). Esta

metodología incluye una serie de pruebas y análisis detallados que permiten evaluar las propiedades TL de los materiales de manera exhaustiva.

4.8.1. Respuesta termoluminiscente de los materiales

La curva de brillo está definida como el gráfico de la intensidad termoluminiscente, I , en función de la temperatura de la muestra durante la lectura. Cada nivel de trampa que contiene el material da lugar a un pico de brillo asociado; por lo que una curva de brillo puede estar formada por varios picos, en dependencia de los niveles de atrapamiento.

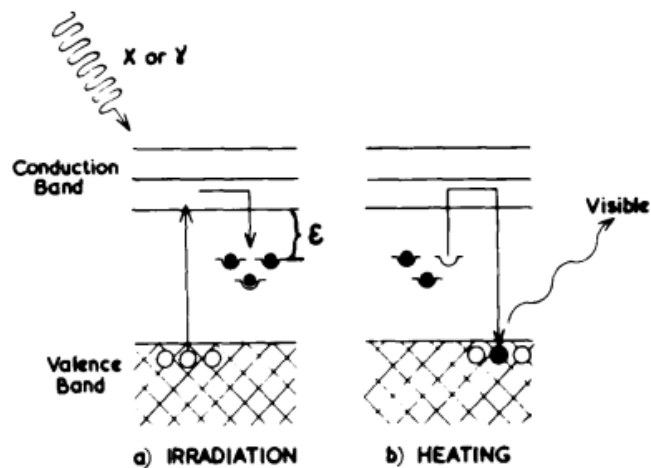


Figura 4.8.1.1. Esquema gráfico del proceso de la termoluminiscencia [24].

Considerando la siguiente ecuación:

$$n = \int_{t_i}^{t_f} I dt' = \frac{1}{\beta} \int_{T_i}^{T_f} I dT' \quad (4.1)$$

donde:

n = Dosis liberada en la muestra termoluminiscente.

T_i = Región de subida inicial del pico.

T_f = Región de fin del pico.

β = Tasa de recombinación de los electrones.

La **ecuación 4.1** es de gran importancia para la dosimetría de radiaciones en termoluminiscencia. Partiendo de la ecuación para entender el comportamiento de los

materiales, los cristales y vidrios de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇ fueron sometidas a irradiaciones de 6 MV con rayos de alta energía con el objetivo de corroborar que sean termoluminiscentes cuando interactúan con la radiación [23,24].

4.8.2. Parámetros cinéticos

En esta sección, se determinaron los parámetros cinéticos de las curvas de brillo con mejor respuesta TL de los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇, dichas matrices fueron irradiadas a una dosis de 3 Gy (Respetando las mismas condiciones de irradiación de la **Sección 4.6**), se colectó su lectura, para entender el comportamiento y caracterizar los parámetros cinéticos, para este punto se utilizó un análisis de deconvolución computarizado (CGCD), este análisis nos permite entender con que tipo de cinética son liberados los electrones de las trampas cuando se encuentran cargadas, ya sea por cinéticas de primer orden, de segundo orden, orden general, orden mixto, orden aproximado, entre otros. Dependiendo el tipo de cinética este entrega variables de dicha cinética como:

n_0 = concentración inicial de electrones atrapados (cm⁻³)

E= energía de activación (eV)

b= Factor de la forma.

s= Factor de frecuencia (s⁻¹)

Para obtener dichos parámetros cinéticos se apoyó del software TLAnal, con este se definieron las cinéticas de las trampas que entregaran un FOM (Figure of Merit) aceptable \leq a %5, dicha métrica sirve para indicarnos que tan efectiva es tu deconvolución computarizada y se expresa de la siguiente manera:

$$FOM = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{|y_i - \widehat{y}_i|}{A} \times 100\% \quad (4.2)$$

donde y_i and \widehat{y}_i denotan los valores i-ésimo observado y ajustado, respectivamente; y A es el área de la curva de brillo ajustada y n el número de puntos dados ajustados. Para finalmente se tabular las características de esas curvas de brillo [25,26,27].

4.8.3. Reproducibilidad en la respuesta TL

En esta prueba se utilizaron los valores de TL de los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇, estos se irradiaron para corroborar una reproducibilidad en sus curvas de brillo, se borraron después de haber colectado su lectura y se volvieron a irradiar al menos 3 veces cada muestra, hasta alcanzar la misma dosis de 3 Gy (Todas ellas bajo las mismas condiciones de irradiación de la **Sección 4.6**). Para evaluar su reproducibilidad nos basamos en la siguiente ecuación:

$$100 \frac{SD}{\bar{x}} \leq 7.5 \quad (4.3)$$

4.8.4. Curva de Dosis-Respuesta

Para esta prueba los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇ se irradiaron (En las mismas condiciones de irradiación antes mencionada en la **Sección 4.6**) a diferentes dosis de 1, 3 y 6 Gy, respetando un intervalo temporal de irradiación-lectura de 2 horas y media, se cuantificó la respuesta TL sacando la integral de las curvas de brillo y posteriormente se graficaron los resultados para analizar los comportamientos que presenten conforme al aumento de la dosis dichos vidrios y cristales con ayuda del software ORIGIN PRO 2016 [28,29].

4.8.5. Fading

Finalmente, se irradiaron nuevamente los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇ a una dosis de 3 Gy a diferentes tiempos de irradiación-lectura, la primera lectura se hizo respetando el intervalo de tiempo previamente establecido de 2 horas y media (L₀), la segunda lectura se hizo 24 horas después de la irradiación (L₁), el tercer, lectura se realizó 48 horas después de la irradiación (L₂) y una lectura de 10 días o 240 horas después de la irradiación (L₃). El grupo de vidrios y cristales se resguardó en el laboratorio de termoluminiscencia del CICATA, Unidad Legarí en un cuarto oscuro para descartar contribución de la luz solar o del laboratorio.

Se siguió esa metodología para analizar qué tanto se desvanece o se mantiene la señal TL con el paso del tiempo, ya que este es un parámetro fundamental para

caracterizar nuevos materiales y corroborar si presentan utilidad como un dosímetro personal.

Se colectaron las curvas de brillo a diferentes intervalos de tiempo para registrar su valor de TL y posteriormente graficar el desvanecimiento de la respuesta TL de estos materiales a diferentes tiempos [30,31].

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. RESPUESTA TERMOLUMINISCENTE

En la **Figura 5.1.1** se pueden apreciar las curvas de brillo de los cristales de fluoruro de litio irradiados a 3 Gy con rayos X de 6 MV para los diferentes cosolventes: LiF A (fluoruro de litio con cosolventes de agua), LiF M (fluoruro de litio con cosolventes de metanol), LiF E (fluoruro de litio con cosolventes de etanol) y LiF P (fluoruro de litio con cosolventes de propanol). Se puede observar que el fluoruro de litio con diferentes cosolventes presenta una respuesta termoluminiscente y, esta respuesta TL, varía en función del tipo de cosolventes. La curva de brillo del LiF E (fluoruro de litio con cosolventes de etanol) es la que presenta mayor intensidad. Mientras que la curva de brillo del LiF M (fluoruro de litio con cosolventes de metanol) es la que presenta menor intensidad.

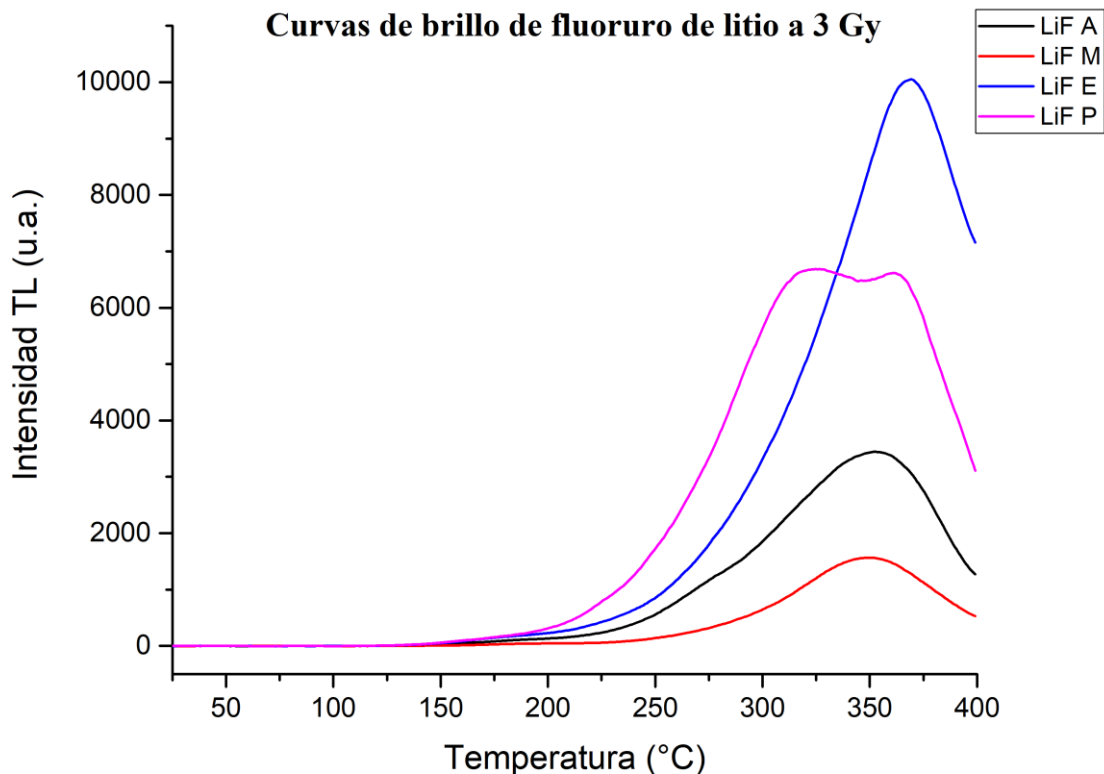


Figura 5.1.1. Curvas de brillo de los cristales de fluoruro de litio irradiados a 3 Gy con rayos X de 6 MV para los diferentes cosolventes: LiF A (fluoruro de litio con cosolventes de agua), LiF M (fluoruro de litio con cosolventes de metanol), LiF E (fluoruro de litio con cosolventes de etanol) y LiF P (fluoruro de litio con cosolventes de propanol).

En la siguiente **Fig. 5.1.2** se pueden observar las curvas de brillo de los cristales de fluoruro de calcio irradiados a 3 Gy con rayos X de 6 MV para los diferentes cosolventes: CaF₂ A (fluoruro de calcio con cosolventes de agua), CaF₂ M (fluoruro de calcio con cosolventes de metanol), CaF₂ E (fluoruro de calcio con cosolventes de etanol) y CaF₂ P (fluoruro de calcio con cosolventes de propanol). Se puede observar que el fluoruro de calcio con diferentes cosolventes presenta una respuesta termoluminiscente y, esta respuesta TL, varía en función del tipo de cosolventes. Las curvas de brillo del CaF₂ A (fluoruro de calcio con cosolventes de agua) y CaF₂ P (fluoruro de calcio con cosolventes de propanol) son las que presentan mayor intensidad. Mientras que las curvas de brillo del CaF₂ M (fluoruro de calcio con cosolventes de metanol) y CaF₂ E (fluoruro de calcio con cosolventes de etanol) presentan menor intensidad.

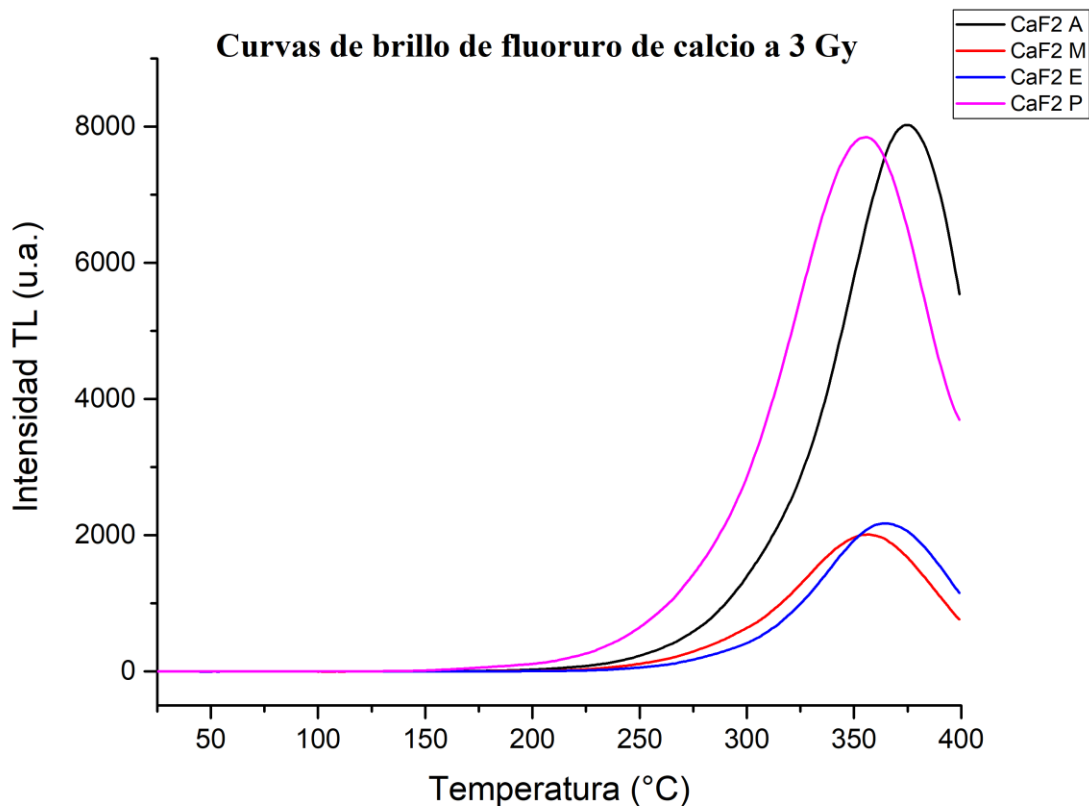


Figura 5.1.2. Curvas de brillo de los cristales de fluoruro de calcio irradiados a 3 Gy con rayos X de 6 MV para los diferentes cosolventes: CaF₂ A (fluoruro de calcio con cosolventes de agua), CaF₂ M (fluoruro de calcio con cosolventes de metanol), CaF₂ E (fluoruro de calcio con cosolventes de etanol) y CaF₂ P (fluoruro de calcio con cosolventes de propanol).

En la **Fig. 5.1.3** se presentan las curvas de brillo de los vidrios de borato de litio irradiados a 3 Gy con rayos X de 6 MV. Notamos que el uso de borato de litio con diferentes tierras raras también presentó respuesta termoluminiscente y varió en función conforme se incrementó el dopante, destacando únicamente las respuestas del borato de litio con dopado con tierras raras 50% de masa de iterbio y disprosio con un 2% de masa de nanopartículas de cobre (Cu2) y borato de litio con 50% de masa de disprosio e iterbio con un 8% de masa de nanopartículas de cobre (Cu5), esto debido a que los demás vidrios tuvieron una respuesta termoluminiscente nula al ser irradiados con rayos X de alta energía de 6 MV, por lo que fueron descartados para la experimentación.

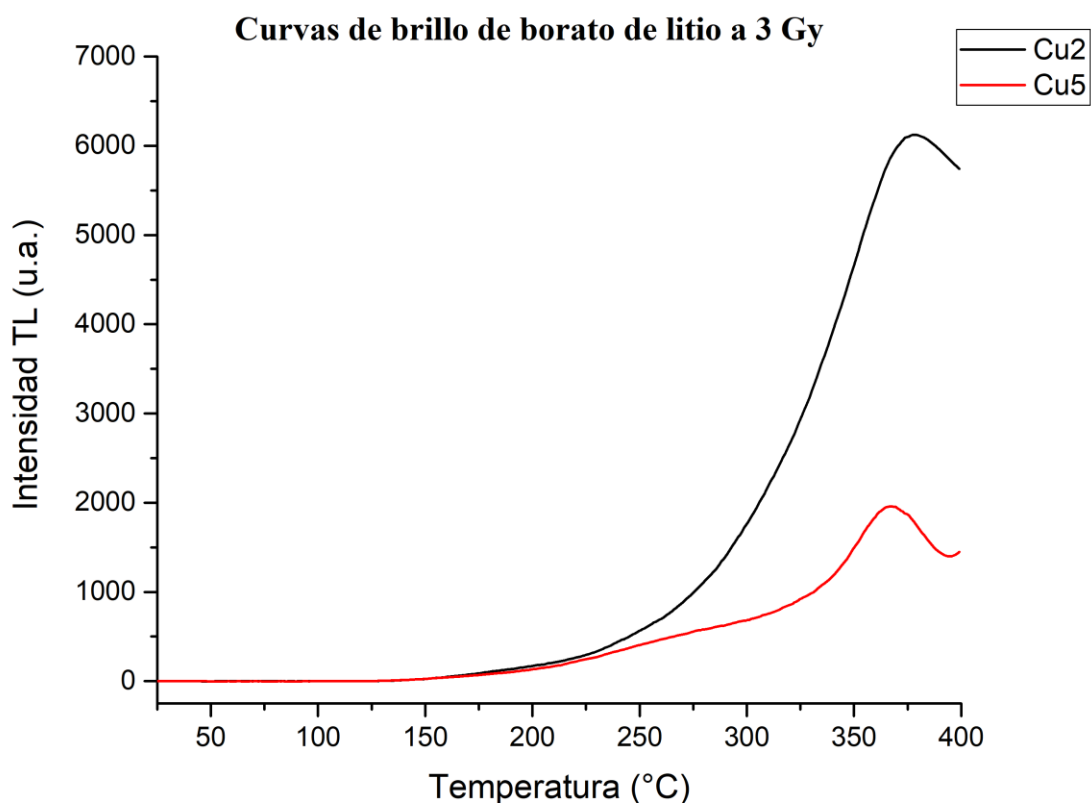


Figura 5.1.3. Curvas de brillo de vidrios de borato de litio expuestos a una dosis de 3 Gy para los vidrios de del borato de litio con dopado con tierras raras 50% de masa de iterbio y disprosio con un 2% de masa de nanopartículas de cobre (Cu2) y borato de litio con 50% de masa de disprosio e iterbio con un 8% de masa de nanopartículas de cobre (Cu5).

Con esta sección confirmamos si los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇ presentarían respuesta termoluminiscente a pesar de ser nuevos materiales sintetizados en el laboratorio de la Universidad de Guanajuato, Campus León. Ya que la literatura reportada o los antecedentes sobre estos materiales, solo reportan que fueron expuestos a rayos X de baja energía, fuentes abiertas o rayos UV y confirmamos para el caso de los cristales según reporta Zavala et al. (2021) y Vu Thi Thai Ha et al. (2022) que el uso de cosolventes modifica las trampas de los cristales, esto es un gran beneficio en el desarrollo de la dosimetría termoluminiscente, ya que los cosolventes no afectan el número atómico efectivo ($Z_{\text{effective}}$) y hace que el material sea lo más parecido al número atómico efectivo del tejido humano.

5.2. PÁRAMETROS CINÉTICOS

La caracterización de los parámetros cinéticos de cristales de LiF, CaF₂ y vidrios de Li₂B₄O₇ se realizó mediante el análisis de la deconvolución computarizada (CGCD, por sus siglas en inglés) con ayuda del software TLAnal, el software permite asignar cinéticas de diferente orden con el objetivo de entender cómo se comportan las trampas de los cristales y vidrios seleccionados. Además, entrega la Figure of Merit (FOM), es una métrica que indica el porcentaje de efectividad que tiene una deconvolución realizada en base a las cinéticas seleccionadas, entregando los siguientes resultados:

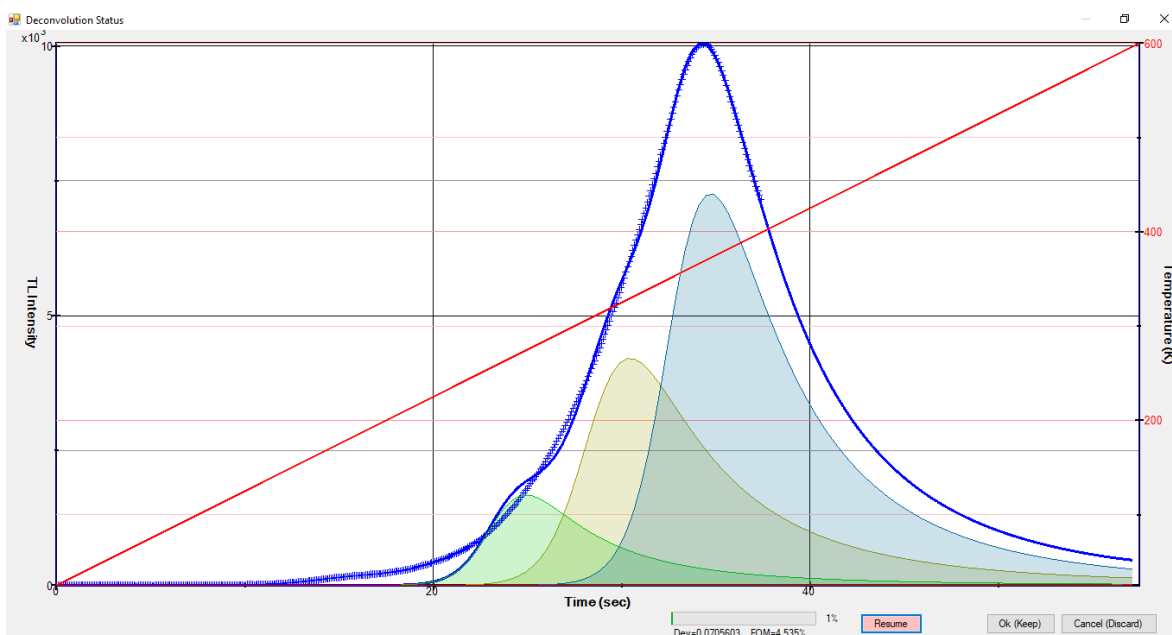


Figura 5.2.1. Deconvolución computarizada de cristal de fluoruro de litio con cosolvente de etanol (LiF E).

Tabla 5.2.1. Parámetros cinéticos de cristal de fluoruro de litio con cosolvente de etanol (LiF E).

E (eV)	s ⁿ	b	n0	Trampa	Tipo
6.25E-01	1.64E+09	5.17E+00	4.54E+04	1	Cinética de Orden General
5.20E-01	1.72E+09	5.11E+00	1.57E+04	2	Cinética de Orden General
8.52E-01	1.91E+11	5.21E+00	7.22E+04	3	Cinética de Orden General

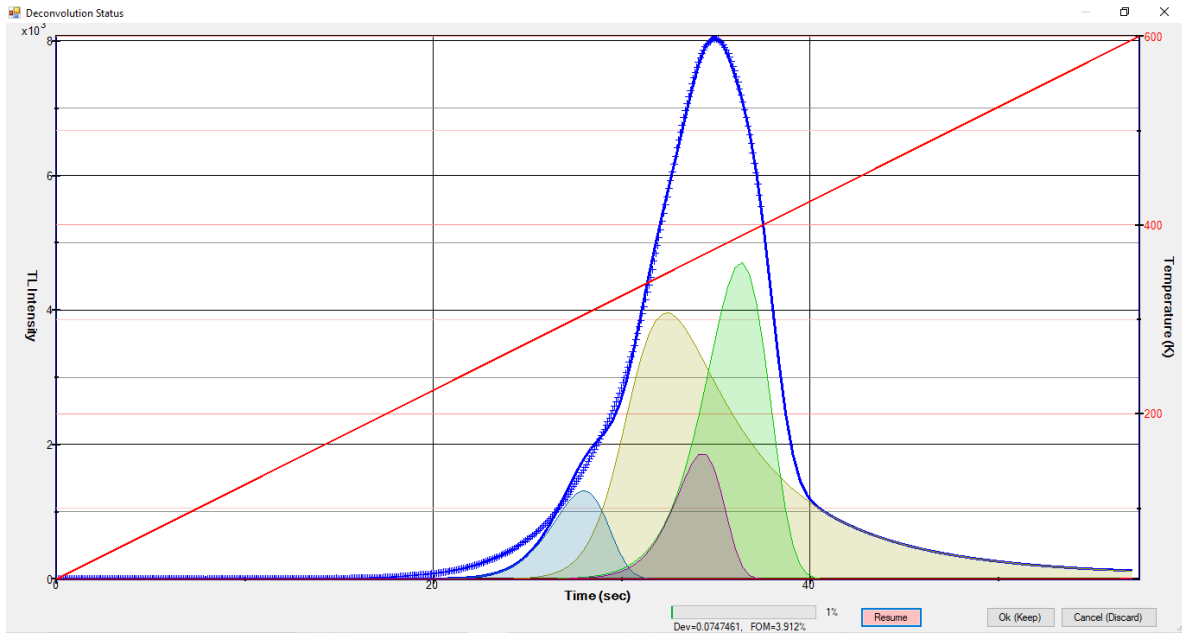


Figura 5.2.2. Deconvolución computarizada de cristal de fluoruro de calcio con cosolvente de agua (CaF₂ A).

Tabla 5.2.2. Parámetros cinéticos de cristal de fluoruro de calcio con cosolvente de agua (CaF₂ A)

E (eV)	s	s''	b	n0	Trampa	Tipo
8.16E-01	NA	3.31E+11	5.47E+00	3.89E+04	1	Cinética de orden general
7.51E-01	3.19E+09	-	-	2.01E+04	2	Cinética de primer orden
5.23E-01	2.56E+08	-	-	5.37E+03	3	Cinética de primer orden
8.92E-01	1.24E+12	-	-	6.05E+03	4	Cinética de primer orden

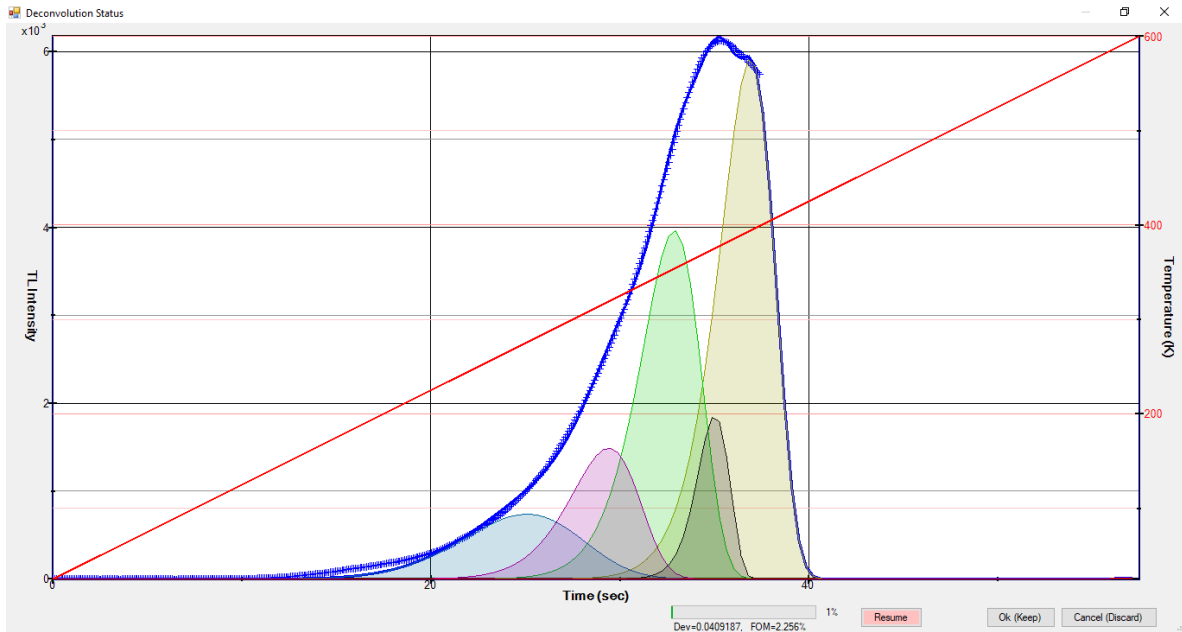


Figura 5.2.3. Deconvolución computarizada de vidrio de borato de litio dopado con tierras raras y nanopartículas de cobre (Cu₂).

Tabla 5.2.3 Parámetros cinéticos de vidrio de borato de litio dopado con tierras raras y nanopartículas de cobre (Cu₂)

E (eV)	s	s''	α	n0	Trampa	Tipo
8.81E-01	1.22E+11	-	-	2.29E+04	1	Cinética de primer orden
6.48E-01	1.05E+09	-	-	1.66E+04	2	Cinética de primer orden
1.85E-01	7.34E+02	-	-	5.80E+03	3	Cinética de primer orden
4.54E-01	7.98E+06	-	-	7.12E+03	4	Cinética de primer orden
1.69E+00	NA	3.94E+22	4.90E-01	4.08E+03	5	Cinética de orden mixto

Las figuras anteriores son las deconvoluciones computarizadas de los vidrios y cristales que mostraron mayor amplitud en su respuesta TL, además de que mostraron un $FOM \leq 5\%$, según Lozano Rojas *et al.* (2011). Dándonos los siguientes resultados:

Tabla 5.2.4. Figures of merit (FOM) de las deconvoluciones realizadas en los vidrios y matrices.

Matriz	LiF E	CaF ₂ A	Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu ₂)
FOM (%)	4.535	3.912	2.256

Como se puede apreciar en la **Tabla 5.2.4** los FOM entregados cumplen con el rango de aceptación que reporta la literatura y dichos materiales presentan cinéticas relativamente simples para realizar estudios exhaustivos y seguir experimentando en este nuevo tipo de materiales, haciendo énfasis en la física médica para la parte de dosimetría.

5.3. REPRODUCIBILIDAD

En esta sección se procedió en realizar una prueba de reproducibilidad en la respuesta TL irradiando los vidrios y cristales 3 veces a una dosis conocida de 3 Gy con el objetivo de verificar si había reproducibilidad en las respuestas utilizando la ecuación de la **sección 4.8.3**, dándonos los siguientes resultados:

Tabla 5.3.1. Resultados de la prueba de reproducibilidad de los cristales de fluoruro de litio (LiF)

Cristal	LiF A	LiF M	LiF E	LiF P
Respuesta TL	530618.72	135444.15	853834.51	815983.01
	342373.33	133739.57	139913.69	203613.04
	109094.15	27377.37	451913.75	311335.40
Media	327,362.067	98853.70	481887.32	443643.813
Desv. estándar	172413.737	50546.186	292226.561	266931.181
Error (%)	52	51	60	60

Tabla 5.3.2. Resultados de la prueba de reproducibilidad de los cristales de fluoruro de calcio (CaF₂)

Cristal	CaF ₂ A	CaF ₂ M	CaF ₂ E	CaF ₂ P
Respuesta TL	547554.54	160563.88	236789.40	714729.26
	528903.66	101999.70	156346.33	673614.99
	199493.62	89660.45	53977.32	247427.12
Media	425317.27	117408.01	149037.68	545257.13
Desv. estándar	159862.87	30928.80	74811.43	211265.44
Error (%)	38	26	50	39

Tabla 5.3.3. Resultados de la prueba de reproducibilidad de los vidrios de borato de litio (Li₂B₄O₇)

Vidrio	Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu2)	Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu5)
Respuesta TL	507497.78	175660.10
	4802.07	8977.87
	5812.64	5294.96
Media	172704.16	63310.98
Desv. estándar	236735.20	79457.05
Error (%)	137	125

En las anteriores tablas se puede apreciar que el error es más grande al aceptable según reporta la literatura ($\text{Error} \leq 7.5\%$), sacando algunas conclusiones inferimos que se da este valor en el porcentaje de error debido a que no se contó con suficientes repeticiones en las irradiaciones y que probablemente al tener un número limitado de muestras, estas comenzaron a presentar un daño que afectó los resultados en esta prueba, sin embargo, se cree que si se repite esta prueba con un mayor número de muestras y con la posibilidad de tener más repeticiones en las irradiaciones, la estadística en la prueba de reproducibilidad mejoraría bastante sobre todo para el caso de los cristales de fluoruro de calcio que mostraron un porcentaje de error más bajo en comparación con los demás.

5.4. CURVA DE DOSIS-RESPUESTA

En esta sección se irradiaron los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇ a diferentes dosis con el objetivo de analizar si la respuesta se mostraría lineal a bajas y altas dosis, las condiciones de irradiación fueron las mismas establecidas en la **Sección 4.6**, con la diferencia que aumentaron las unidades monitor (UM) para aumentar o disminuir la dosis.

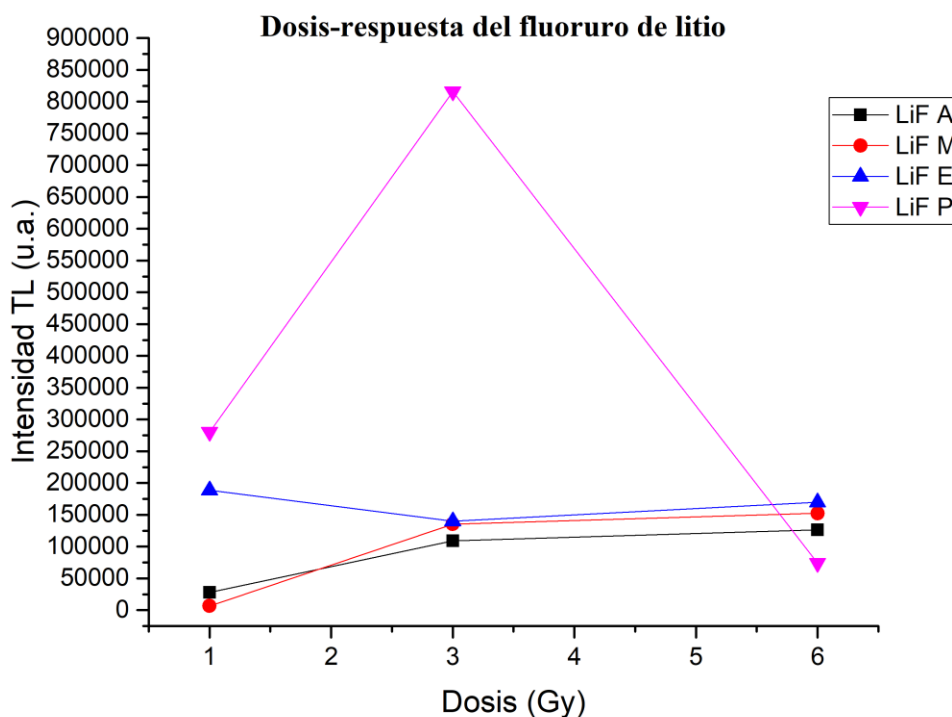


Figura 5.4.1. Dosis-respuesta de los cristales de fluoruro de litio (LiF) a 1, 3 y 6 Gy con rayos X de alta energía.

Cómo se puede apreciar en la **Figura 5.4.1** el fluoruro de litio (LiF) mostró respuestas a diferentes dosis diferente a lo que se esperaría; sin embargo, algunos cristales como el fluoruro de litio con cosolvente de metanol (LiF M) y el fluoruro de litio con cosolvente de agua (LiF A) tienen un comportamiento lineal al aumentar y disminuir la dosis, para corroborar esto se realizó una prueba de regresión lineal (R^2) con el fin de tener una prueba estadística que reitere si hay linealidad, dando los siguientes resultados para los cristales de LiF:

Tabla 5.4.1. Prueba de regresión lineal en cristales de LiF con sus respectivos cosolventes.

Cristal	LiF A	LiF M	LiF E	LiF P
R^2	0.726	0.677	0.059	0.142

Las respuestas de los cristales de fluoruro de litio pueden deberse a que dicho material tarda en estabilizar sus trampas con el uso de cosolventes, el intervalo de tiempo entre irradiación-lectura e incluso el desgaste por reutilizar dichos cristales para realizar las pruebas, sin embargo, se puede confirmar que algunos cosolventes de los cristales mostraron una respuesta no lineal en ese rango de dosis.

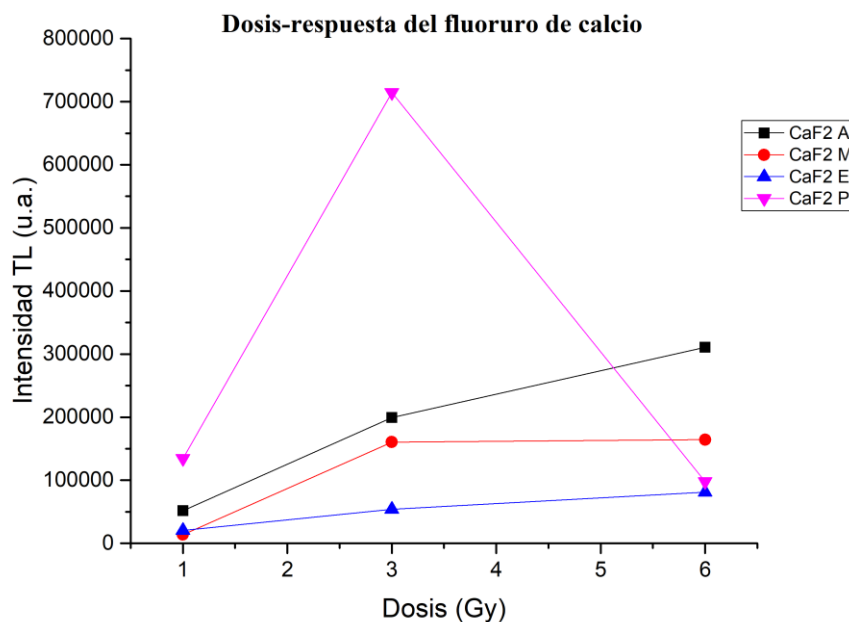


Figura 5.4.2. Dosis-respuesta de los cristales de fluoruro de calcio (CaF_2) a 1, 3 y 6 Gy con rayos X de alta energía.

La **Figura 5.4.2** mostró el comportamiento dosis-respuesta del fluoruro de calcio (CaF_2) diferentes dosis, con un comportamiento más esperado; se puede apreciar cómo los cristales como el fluoruro de calcio con cosolvente de agua (CaF_2 A) y el fluoruro de calcio con cosolventes de etanol (CaF_2 E) tienen un comportamiento lineal más marcado al aumentar y disminuir la dosis, para corroborar esto, al igual que los cristales de LiF , se realizó una prueba de regresión lineal (R^2) con el fin de tener una prueba estadística que reitere si hay linealidad, dando los siguientes resultados para los cristales de CaF_2 :

Tabla 5.4.2. Prueba de regresión lineal en cristales de CaF_2 con sus respectivos cosolventes.

Cristal	CaF_2 A	CaF_2 M	CaF_2 E	CaF_2 P
R^2	0.962	0.652	0.970	0.069

Por otro lado, las respuestas de los cristales de fluoruro de calcio se pueden apreciar que tienen una respuesta lineal muy alta según la prueba de correlación lineal (R^2) en ese rango de dosis, a pesar de estar bajo las mismas condiciones que los cristales de fluoruro de litio, por lo que este material es prometedor para este tipo de pruebas, además de confirmar que tienen respuesta TL al interactuar con rayos X de alta energía.

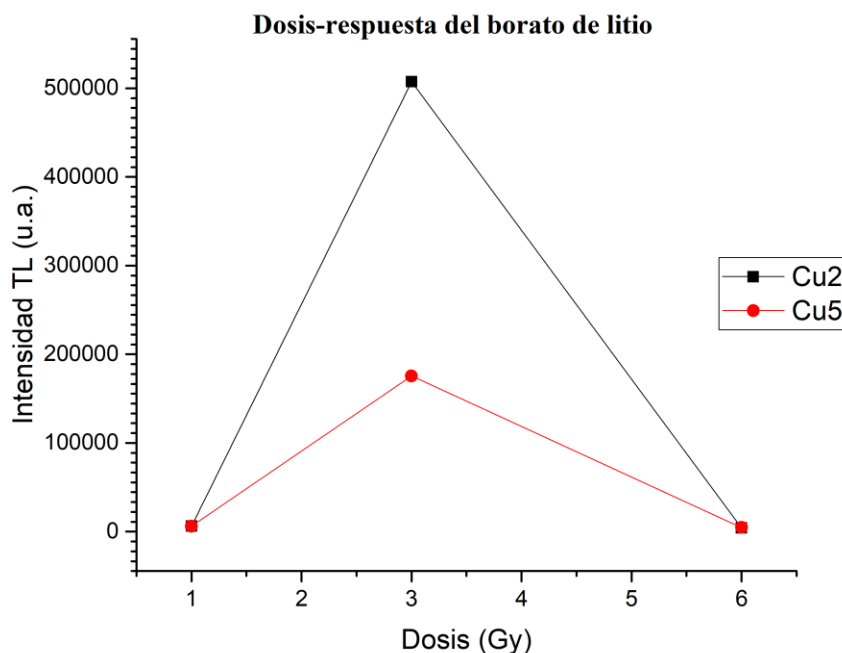


Figura 5.4.3. Dosis-respuesta de los vidrios de borato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) a 1, 3 y 6 Gy con rayos X de alta energía.

Finalmente, la **Figura 5.4.3** nos muestra el comportamiento dosis-respuesta de los vidrios de borato de litio en diferentes rangos de dosis, dicho comportamiento no fue esperado, ya que los vidrios dejan de ser lineales a partir de los 3 Gy en adelante, por lo que en futuras investigaciones sería beneficioso que se irradiaran en un rango menor a 3 Gy, al hacer la prueba de regresión lineal (R^2) se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.4.3. Prueba de regresión lineal de vidrios de $Li_2B_4O_7$ con sus respectivos dopantes.

Vidrios	$Li_2B_4O_7$ (Cu2)	$Li_2B_4O_7$ (Cu5)
R^2	0.014	0.015

A pesar de que dichos vidrios dieron una respuesta no lineal, se puede continuar investigando dichos vidrios con dopantes a dosis bajas (menor a 3 Gy) para corroborar si a altas dosis su respuesta se mantiene lineal y es conveniente seguir investigándolos por su $Z_{efectivo}$ de 7.4.

5.5. FADING

Para esta sección se analizó el desvanecimiento (fading) de los vidrios y cristales de LiF, CaF_2 y $Li_2B_4O_7$, dicha prueba se realizó irradiándolos hasta alcanzar una dosis de 3 Gy, pero variando tiempo de lectura post-irradiación como se mencionó en la **Sección 4.8.5**.

Teniendo una lectura postirradiación de 2 horas y 30 minutos (L_0), otra lectura postirradiación de 24 horas o 1 día (L_1), otra lectura postirradiación de 48 horas o 2 días (L_2) y una última lectura postirradiación de 10 días (L_3). Donde los resultados fueron los siguientes:

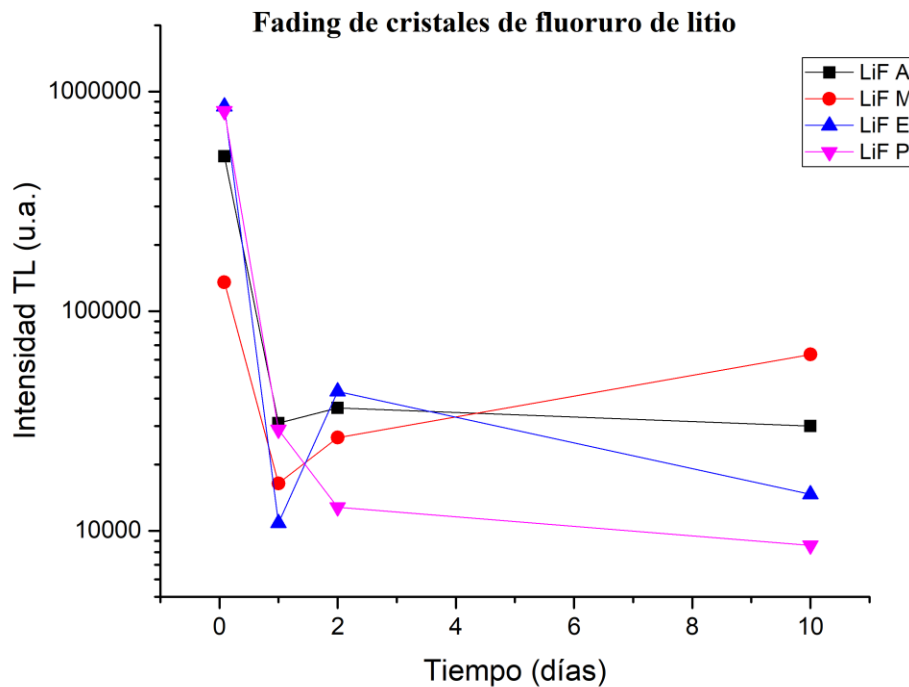


Figura 5.5.1. Fading de los cristales de fluoruro de litio (LiF) a través del tiempo.

En la **Figura 5.5.1** se muestra el comportamiento del fading (desvanecimiento) sobre los cristales de fluoruro de litio, estos mostraron un comportamiento irregular de la respuesta TL a través del tiempo, esto puede deberse al uso constante de estos materiales o que las trampas del cristal tardan en estabilizarse, siendo el cristal con cosolvente de propanol (LiF P); aquel cristal que tuvo una respuesta “congruente” con el tiempo teniendo una pérdida de información con respecto a L_0 a L_3 del **98.95%** en ese periodo de tiempo transcurrido.

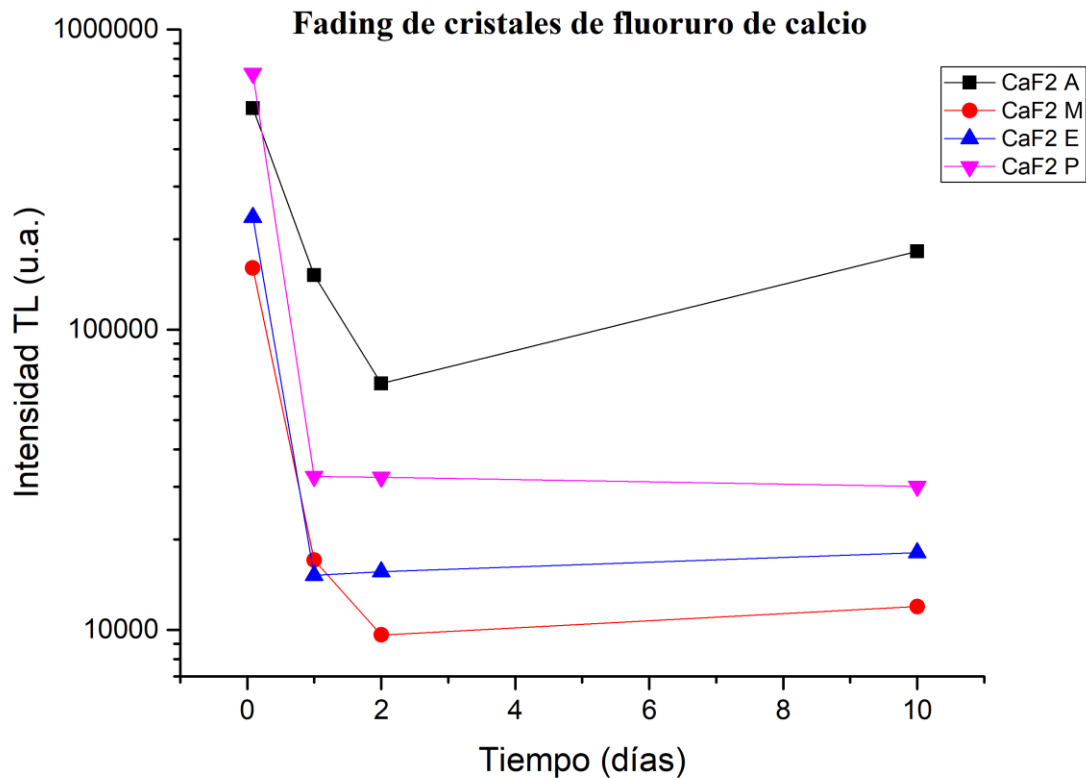


Figura 5.5.2. Fading de los cristales de fluoruro de calcio (CaF₂) a través del tiempo.

Siguiendo con la **Figura 5.5.2** se puede apreciar el comportamiento del fading (desvanecimiento) sobre los cristales de fluoruro de calcio, estos mostraron un comportamiento diferente en su respuesta TL a comparación de los cristales de LiF a través del tiempo, destacando los cristales con cosolvente de metanol (CaF₂ M) y cosolvente de propanol (CaF₂ P); aquellos cristales mantuvieron la respuesta TL a partir de 24 horas postirradiación L₁ a L₃ con el tiempo teniendo una pérdida de información de L₀ a L₃ del **93.12%** con respecto a la respuesta L₀ y luego se mantiene la respuesta en ese periodo de tiempo.

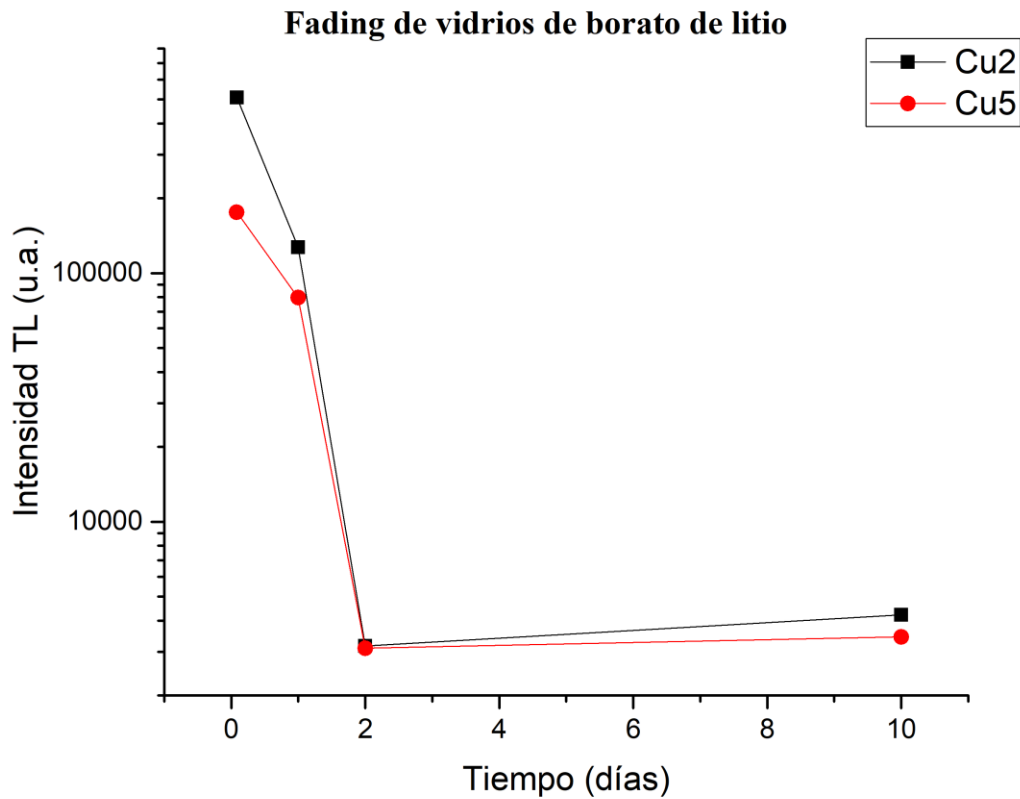


Figura 5.5.3. Fading des vidrios de borato de litio ($Li_2B_4O_7$) a través del tiempo.

Finalmente, en la **Figura 5.5.3** se puede apreciar el comportamiento del fading (desvanecimiento) sobre los vidrios de borato de litio, estos mostraron un comportamiento regular de la respuesta TL hasta L_2 a través del tiempo, luego de eso los vidrios mostraron una respuesta irregular al llegar a L_3 , teniendo una pérdida de información total del **98.60%** con respecto al L_0 en ambos vidrios.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Algunas conclusiones que rescatamos referente al trabajo de investigación realizado es que los materiales estudiados irradiados con rayos X de 6 MV muestran respuesta TL, esto da apertura a realizar otras pruebas cómo variar la energía de los rayos X de alta energía o utilizar haces de electrones a diferentes energías para entender la respuesta de estos materiales a diferentes energías, tipos de radiación o incluso realizar experimentación con fuentes abiertas si ese fuera el caso. El uso de cosolventes y dopantes efectivamente afectó la respuesta TL de los materiales con el beneficio que no afecta el Z_{efectivo} del material, por lo que se encuentran cerca de Z_{efectivo} del tejido humano.

Referente a los parámetros cinéticos, los materiales estudiados mostraron en su mayoría cinéticas de primer orden. Esto significa que el proceso de liberación de electrones desde las trampas sigue una dependencia exponencial simple, donde la tasa de liberación es directamente proporcional al número de electrones atrapados, lo que facilita tanto su modelado matemático como la interpretación de los resultados, sin embargo, no hay que olvidar que esos parámetros caracterizan solo los materiales irradiados con rayos X de 6 MV, por lo que sería interesante analizar dichos parámetros con diferentes energías o tipo de radiación, buscando mejorar la dosimetría termoluminiscente con la inclusión de estos nuevos materiales.

En las pruebas de reproducibilidad de la respuesta TL, una limitante que se presentó fue tener un número limitado de muestras y por la disponibilidad del acelerador lineal, los resultados mostraron un error muy grande, contribuyendo al valor de la incertidumbre factores cómo el desgaste de las muestras o el número limitado de irradiaciones que originó esos grandes porcentajes de error, cómo se mencionó anteriormente es recomendable continuar con la investigación que cuente con un número mayor de muestras y más repeticiones en las irradiaciones que mejoren la estadística de la misma, para realizar esta prueba con un margen de error menor.

Sobre las pruebas de curva-dosis respuesta, estos nuevos materiales se comportaron lineales en casos particulares, la razón de esto puede deberse a que quizás las trampas se llegan a estabilizar después de cierto tiempo, el número limitado de irradiaciones a diferentes

dosis o que se encuentran lineales antes de una dosis tan alta como 6 Gy, sin embargo; los cristales de fluoruro de calcio con sus cosolventes, mostraron los mejores resultados por lo que se recomienda realizar más investigación sobre este material para este tipo de pruebas.

Finalmente, para la prueba de Fading (Desvanecimiento), los materiales presentaron en su mayoría un comportamiento no esperado, sin embargo, al igual que en la prueba de curva-dosis respuesta, se puede apreciar el patrón que el cristal de fluoruro de litio también mostró un fading congruente con el tiempo e incluso mantuvo la respuesta TL después de ciertos días post-irradiación, esto habla muy bien de este material, ya que se busca que los dosímetros, cuantifiquen y almacenen la respuesta TL después de cierto tiempo para la dosimetría personal referente a la seguridad y protección radiológica.

Al caracterizar los vidrios y cristales de LiF, CaF₂ y Li₂B₄O₇ con sus respectivos cosolventes y dopantes, e irradiarlos con rayos X de alta energía (6 MV) con un acelerador clínico, dejaron una base para poder seguir realizando experimentación a estos nuevos materiales. Con base en los resultados se puede apreciar las ventajas que representan estos cosolventes en los cristales y dopantes en los vidrios.

Proyectando a futuro se espera continuar esta investigación con diferentes tipos de radiación, fuentes y con un mayor número de lotes ya sea en un posible doctorado o durante el ámbito laboral en que me encuentre, ya que esta investigación deja las bases para continuar experimentando y sobre todo buscar la mejora en la física Médica en el caso de la dosimetría y la radioterapia.

REFERENCIAS

1. Vallejo MA, Sosa MA, Rivera E, et al. Effect of Crystal Size and Ag Concentration on the Thermoluminescent Response of Pure and Ag-Doped LiF Cubes. *NANO*. 2016;11(04):1650041. doi:10.1142/S1793292016500417
2. Vallejo MÁ, Sosa MA, Villalobos ML, et al. Thermoluminescent response and kinetic parameters of Eu³⁺-doped LiF crystals exposed to X-rays. *Journal of Luminescence*. 2017;182:160-165. doi:10.1016/j.jlumin.2016.10.018
3. Vallejo MA, Rivera E, Azorín JC, et al. Effect of Synthesis Temperature on Morphological and Luminescent Properties of Lithium Fluoride Crystals. *j nanosci nanotechnol*. 2017;17(8):5612-5616. doi:10.1166/jnn.2017.13801
4. Vallejo MA, Perez M, Ceron PV, et al. Photoluminescence and Thermoluminescence of Phosphate Glasses Doped with Dy³⁺ and Containing Silver Nanoparticles. *NANO*. 2017;12(12):1750145. doi:[10.1142/S1793292017501454](https://doi.org/10.1142/S1793292017501454)
5. Vallejo MA, Elias JA, Honorato M, et al. Silver Nanoparticles Enhance Thermoluminescence and Photoluminescence Response in Li₂B₄O₇ Glass Doped with Dy³⁺ and Yb³⁺. *J Fluoresc*. 2020;30(1):143-150. doi:[10.1007/s10895-019-02479-w](https://doi.org/10.1007/s10895-019-02479-w)
6. Thiyagarajan S, Vallejo MA, Cerón P, et al. Thermoluminescence of Cu-Doped Li₂B₄O₇+PTFE Annealed by Graphene Exposed to X-Rays and Gamma Radiation. *J Mol Eng Mater*. 2020;08(03n04):2050005. doi:[10.1142/S2251237320500057](https://doi.org/10.1142/S2251237320500057)
7. Oliveira, L. S., Souza, L. F., Pereira, W. B., D'Emidio, M. F., Souza, D. N., & Nogueira, M. S. (2020). Cerium-doped lithium tetraborate for thermoluminescent dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 177, 109127.
8. Ogundare FO, Raji MN. Thermoluminescence characteristics of CaF₂:Mn irradiated to environmental-like doses. *Journal of Luminescence*. 2021;234:117942. doi:[10.1016/j.jlumin.2021.117942](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.117942)
9. Bhadane MS, Gavhane KH, Kulkarni PP, et al. Particle size dependent TL response of CaF₂:Dy phosphor for gamma dosimetry. *Journal of Luminescence*. 2020;223:117168. doi:[10.1016/j.jlumin.2020.117168](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117168)
10. Gibbons, J. P. (2020). Khan's The physics of radiation therapy (6.^a ed.). New Orleans, Louisiana.
11. Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2018). Radiobiology for the Radiologist (8.^a ed.).
12. Kry SF, Alvarez P, Cygler JE, et al. AAPM TG 191: Clinical use of luminescent dosimeters: TLDs and OSLDs. *Med Phys*. 2020;47(2). doi:[10.1002/mp.13839](https://doi.org/10.1002/mp.13839)
13. Furetta, C., & Weng, P. S. (1998). *Operational thermoluminescence dosimetry*. World Scientific.
14. MEDEIROS, M. T. S. D. (2022). Luminescência opticamente estimulada do fluoreto de cálcio dopado com terras-raras e metais produzidos por meio da síntese de combustão em solução.
15. Horowitz, Y. S., Oster, L., & Eliyahu, I. (2019). The saga of the thermoluminescence (TL) mechanisms and dosimetric characteristics of LiF: Mg, Ti (TLD-100). *Journal of Luminescence*, 214, 116527.

16. Sadeghi, M., Sina, S., & Faghihi, R. (2015). Investigation of LiF, mg and Ti (TLD-100) reproducibility. *Journal of biomedical physics & engineering*, 5(4), 217.
17. Ray, D. S., & Tadge, D. P. (2021). A comprehensive review on rare-earth based thermoluminescence phosphors for Radiation Dosimetry. *SPAST Abstracts*, 1(01). Retrieved from <https://spast.org/techrep/article/view/1569>.
18. Richter, -Andreas, & Thanga Kumar, I. (2014). Instruction Manual lexsygs smart-Automated TL/OSL Reader. www.freiberginstruments.com
19. Zavala, N., Gómez-Solís, C., Vallejo, M. A., Navarro, R., Cerón, P., & Sosa, M. A. (2021). Comparative analysis of the TL response due to the modification of the co-solvent in the synthesis of LiF. *Materials Letters*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129750>
20. Ha, V. T. T., Do, T. A. T., Nguyen, T. T., & Ung, T. D. T. (2023). Luminescence and thermoluminescence of Er³⁺-doped CaF₂ nanomaterials. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 178(3–4), 442–455. <https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2150972>
21. Alaniz, T. G., Elias, J. A., Leon, M., Torres-Castro, A., & Vallejo, M. A. (2024). Shielding properties of Li₂B₄O₇:Dy³⁺,Yb³⁺ glass containing copper nanoparticles. *Radiation Physics and Chemistry*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111792>
22. Lozano Rojas, I. B. (2011). *Síntesis y Caracterización de LiF: Mg, Ti para Dosimetría de Radiaciones Ionizantes* (Doctoral dissertation).
23. Furetta, C. (2010). *Handbook of thermoluminescence*. World Scientific.
24. Spurny, Z. (1965). Thermoluminescent dosimetry. *Atomic Energy Review*, 3(2), 61.
25. Kumar, M. Principles of thermoluminescence dosimetry. *BARC Mumbai*.
26. Balian, H. G., & Eddy, N. W. (1977). Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectral peaks. *Nuclear Instruments and Methods*, 145(2), 389-395.
27. Peng, J., Kitis, G., Sadek, A. M., Asal, E. C. K., & Li, Z. (2021). Thermoluminescence glow-curve deconvolution using analytical expressions: A unified presentation. *Applied Radiation and Isotopes*, 168, 109440.
28. Horowitz, Y. S. (2001). Theory of thermoluminescence gamma dose response: The unified interaction model. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 184(1-2), 68-84.
29. Olko, P., Bilski, P., El-Faramawy, N. A., Göksu, H. Y., Kim, J. L., Kopec, R., & Waligórski, M. P. R. (2006). *On the relationship between dose-, energy- and LET-response of thermoluminescent detectors. Radiation Protection Dosimetry*, 119(1-4), 15–22. doi:10.1093/rpd/nci611
30. Burgkhardt, B., Herrera, R., & Piesch, E. (1976). Fading characteristics of different thermoluminescent dosimeters. *Nuclear instruments and methods*, 137(1), 41-47.
31. Hudson, F. R. (1985). *Fading properties of thermoluminescent materials. Physics in Medicine and Biology*, 30(4), 351–351. doi:10.1088/0031-9155/30/4/010

32. Chung, K. S., Choe, H. S., Lee, J. I., Kim, J. L., & Chang, S. Y. (2005). A computer program for the deconvolution of thermoluminescence glow curves. *Radiation Protection Dosimetry*, 115(1-4), 343-349.
33. Chung, K. S., Choe, H. S., Lee, J. I., & Kim, J. L. (2007). A new method for the numerical analysis of thermoluminescence glow curve. *Radiation measurements*, 42(4-5), 731-734.