



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

## FACULTAD DE CIENCIAS

“ Respuesta termoluminiscente de  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$   
inducida por bajas fluencias de iones.”

### T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

### F Í S I C O

P R E S E N T A:

**MIGUEL ANGEL MONROY RODRIGUEZ**

DIRECTORA DE TESIS:

M. en C. GUERDA MASSILLON JACQUES-LOUIS

2006





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de Datos del Jurado

Datos del alumno.

Monroy

Rodríguez

Miguel Angel

Teléfono: 58 85 34 78

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

Datos del tutor.

M. en C.

Guerda

Massillon

Jacques-Louis

Datos del sinodal 1

Dra.

Olga Leticia

Avila

Aguirre

Datos del sinodal 2

Dra.

María Ester

Brandan

Siqués

Datos del sinodal 3

Dra.

María Isabel

Gamboa

de Buen

Datos del sinodal 4

M. en C.

Patricia Raquel

Avilés

Mandujano

Datos del Trabajo escrito.

“Respuesta termoluminiscente de  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  inducida por bajas fluencias de iones.”

Sin subtítulo

30 páginas

2006

A Don Andrés y Don Chava

Con mucho cariño,

por que me dejaron los mejores ejemplos a seguir.

## **Agradecimientos:**

A mis padres y a mis hermanas por el apoyo, cariño y comprensión que siempre me han dado.

A la M. en C. Guerda Massillon por todo su apoyo, ayuda y paciencia en la realización de la tesis. Por que le debo más de lo que se imagina, desde que me invitó a trabajar con ella.

A los sinodales de tesis por todo su apoyo y asesoría para concluir a tiempo esta tesis, por todo el tiempo dedicado a revisarla, mil gracias: Dra . María Ester Bradan, Dra. Isabel Gamboa de Buen, Dra. Olga Ávila Aguirre, M.en C. Patricia Raquel Avilés.

A la Dra . María Ester Bradan por ser mi asesora ante el Instituto de Física y toda su ayuda.

A la Dra. Isabel Gamboa de Buen por sus valiosas correcciones a la tesis y su amistad. Por todo lo que me enseñó.

A la M. en C. Ana Elena Buenfil por su amistad, su ayuda y comentarios. Y por tener una personalidad tan agradable.

Al M. en C. César Ruíz Trejo, por platicar conmigo y sus consejos, valiosos para el buen término de la presente.

Al Dr. Ernesto Belmont por su apoyo.

A todos mis amigos que con su compañía hicieron de estudiar física un emocionante y alegre estilo de vida: Omar, Jorge, Ricardo Romero, Jaime, Cesar, Enrique, Ricardo (shadow), Victor, Francisco, Bart, Luis Felipe, Margarita, Karina, Adriana, Nadia, Zhenia, Leti, Lety, Almendrita, Hugo David y todos aquellos que por las prisas y los nervios no vienen a mi memoria en este momento.

A mis Alumnos.

Al Equipo de trabajo del Institute Cyclotron de la Universidad de Texas A&M (TAMU).

Al Instituto de Ciencias Nucleares por concederme las facilidades para las irradiaciones en el Gammacell.

A A. E. Buenfil, C. Ruiz Trejo, F. Garcia Flores, M. Veytia y R. Ramírez por su apoyo Técnico.

A los proyectos PAEP-UNAM 102001 y DGAPA- UNAM IN109302.

Al Instituto de Física de la UNAM por el uso de sus instalaciones y equipo.

A la Facultad de ciencias y a la Universidad Nacional Autónoma de México.

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN DEL TRABAJO.....	2
1.2	INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS PESADAS CON LA MATERIA.....	3
1.2.1	<i>Colisiones nucleares</i> .....	3
1.2.2	<i>Colisiones electrónicas</i> .....	3
1.3	DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE .....	4
<b>2</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>7</b>
2.1	PREPARACIÓN Y LECTURA DE LOS DOSÍMETROS .....	7
2.2	PROCESO DE IRRADIACIÓN .....	7
2.2.1	<i>Irradiación con rayos gamma de <sup>60</sup>Co</i> .....	7
2.2.2	<i>Irradiación con iones</i> .....	8
2.3	DECONVOLUCIÓN DE LAS CURVAS DE BRILLO .....	10
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>14</b>
3.1	RESPUESTA TL.....	14
3.1.1	<i>Respuesta a radiación gamma de <sup>60</sup>Co</i> .....	14
3.1.2	<i>Respuesta a iones</i> .....	15
3.2	EFICIENCIA RELATIVA (ER).....	16
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>22</b>
6.1	PROGRAMA PARA CALCULAR LA ENERGÍA DEPOSITADA EN CaF <sub>2</sub> :Tm .....	22

# 1 Introducción

El fluoruro de calcio con impurezas de tulio,  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ , conocido comercialmente como TLD-300, es uno de los materiales termoluminiscentes (TL) más usados en campos de radiación mixtos (Sha 88, Bos 95, Bue 99). Bos y colaboradores reportan que la curva de brillo (intensidad de luz como una función de la temperatura) inducida por la radiación ionizante, a una rapidez de calentamiento de  $2 \text{ K s}^{-1}$ , muestra dos picos principales bien definidos a aproximadamente 430 y 530 K (llamados pico 3 y 5, respectivamente de acuerdo con la nomenclatura usual) (Bos 95). También, se ha visto que la forma de la curva de brillo puede variar dependiendo del protocolo que se usa en cada laboratorio, el horneado y la rapidez de calentamiento durante el proceso de lectura (Wan 89).

El intervalo de dosis útil de este dosímetro es de varios miles de Gy (Gal 03). Debido a que la respuesta TL como una función de la dosis es lineal en un intervalo amplio de dosis (hasta aproximadamente 200 Gy (Gal 03)), Shachar y Horowitz (Sha 88) consideraron que este dosímetro es superior al TLD-700 para la dosimetría en un campo mixto neutrón-gamma, usando la relación entre picos 3 y 5.

Se han realizado varios estudios de la respuesta TL del  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  inducida por partículas cargadas pesadas y se han identificado sus características principales (Hof 83, Hof 99, Bos 95, Lon 96, Bue 99). En 1983, Hoffmann y Prediger (Hof 83) estudiaron la respuesta de este material ante irradiación gamma e iones de helio y neon, encontrando que las curvas de brillo inducidas por los iones son muy diferentes a las generadas por rayos gamma, siendo la intensidad del pico 3 mayor para gamma que para iones, mientras que el pico 5 muestra mayor respuesta ante irradiación con iones. Ellos midieron la eficiencia relativa (ER) a rayos gamma de  $^{60}\text{Co}$ , usando las alturas de los picos. Encontraron que la ER para el pico 5 como una función de la transferencia lineal de energía (LET) es constante hasta valores de aproximadamente  $30 \text{ keV}/\mu\text{m}$ , después decrece cuando la LET aumenta, mientras que para el pico 3 la ER siempre disminuye con la LET. Concluyeron que este material puede ser usado en dosimetría de partículas cargadas pesadas como un dosímetro de dos componentes, permitiendo separar los componentes de baja y alta LET en el campo de radiación y a partir de eso, determinar la dosis equivalente biológica en una sola irradiación. Esto se basa en que

consideran la LET como un parámetro unificador. Independientemente, Buenfil y colaboradores (Bue 99) estudiaron la respuesta de este material a irradiación con protones, partículas alfa e iones de carbono usando un protocolo de deconvolución rutinario (descomponiendo la curva brillo en 4 picos de brillo 3, 4, 5 y 6). Ellos midieron la ER como una función de la LET, encontrando que la LET no es el único parámetro que determina la forma de la curva de brillo y la eficiencia relativa. Es importante aclarar que los trabajos antes mencionados fueron realizados bajo diferentes condiciones de horneado y rapidez de calentamiento.

Por otro lado, se cree que el cambio en las alturas de los principales picos en la curva de brillo puede proporcionar información sobre la identidad y la energía de una partícula dada en un campo de radiación desconocido, si todos los dosímetros siguen el mismo procedimiento de horneado y lectura, y si el tiempo entre la irradiación y la lectura es igual para todos (Wan 89). Por ello, se propone realizar más estudios que tomen en cuenta estas condiciones para investigar la supuesta dependencia de la respuesta del  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  con la identidad de la partícula y la energía (Wan 89).

## **1.1 Motivación del trabajo**

Basados en los resultados mencionados en la sección anterior, se estudia la respuesta termoluminiscente (linealidad y eficiencia) de  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  irradiado con baja fluencia de iones ( $10^5 \sim 5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ) de hidrógeno de 25 y 40 MeV/amu, helio de 25 y 40 MeV/amu, carbono de 15, 25 y 40 MeV/amu, oxígeno de 25 MeV/amu y neon de 40 MeV/amu, con el fin de determinar los parámetros del haz incidente que inducen la respuesta TL, lo que permitiría el uso de este material en campos de radiaciones espaciales. Para ello, se siguió un protocolo de deconvolución estricto para poder investigar la respuesta de cada pico individual en la curva de brillo como una función de la partícula, la energía depositada y la LET. Para evaluar la eficiencia relativa, se midió la respuesta TL como función de la dosis absorbida debido a irradiación gamma, considerada como radiación de referencia.

Creemos que este estudio nos permitirá entender mejor los mecanismos básicos del proceso microscópico de depósito de energía por partículas cargadas pesadas en la materia condensada.

## 1.2 Interacción de partículas cargadas pesadas con la materia

Las interacciones de las partículas cargadas pesadas con la materia ocurren mediante colisiones Nucleares y Electrónicas.

### 1.2.1 Colisiones nucleares

En una colisión nuclear, la partícula interactúa con el núcleo atómico, transfiriéndole energía cinética. Este tipo de colisión tiene mayor importancia para partículas incidentes de baja energía en un medio de número atómico  $Z$  alto y es la responsable del desorden ocasionado en la red cristalina por el desplazamiento de los átomos de sus posiciones originales.

### 1.2.2 Colisiones electrónicas

Este tipo de colisiones tiene mayor importancia para partículas de altas energías y medio de  $Z$  bajo. Las partículas transfieren su energía a los electrones atómicos, produciendo ionización y excitación del medio. Durante este proceso las partículas se desvían poco y siguen una trayectoria casi recta. La LET, la cual es la energía perdida por unidad de longitud recorrida por una partícula dada de carga  $z$  y velocidad  $v=c\beta$  ( $c$  es la velocidad de la luz) en un medio de número atómico  $Z$ , de masa atómica  $A$  y de densidad  $\rho$ , se define por la siguiente ecuación (Att 86):

$$LET = \left( \frac{dT}{dx} \right)_c = 4\pi r_0 m_0 c^2 N_A \rho \frac{Zz^2}{A\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_0 c^2 \beta^2}{(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 - \ln I - \frac{C}{Z} \right], \quad (1.1)$$

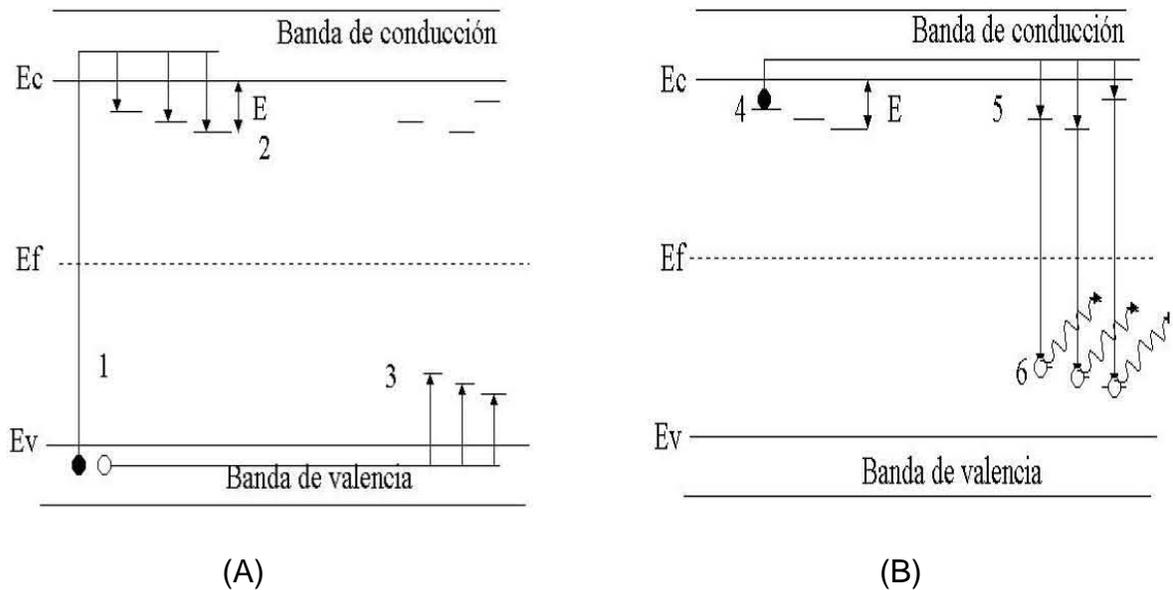
donde  $r_0 = e^2 / m_0 c^2$  es el radio clásico del electrón y  $N_A Z / A$  es el número de electrones, por gramo, del medio absorbente. El argumento del primer logaritmo es la

máxima energía que la partícula incidente puede transferir al electrón en una colisión electrónica e I corresponde al potencial de excitación y está asociado a la mínima energía requerida para que haya una ionización. El término C/Z es una corrección por capa atómica.

### **1.3 Dosimetría termoluminiscente**

Los dosímetros termoluminiscentes son pequeños cristales dieléctricos con masa de entre  $\approx 1$  y  $\approx 100$  mg (Att 86) que contienen activadores adecuados que permiten la emisión luz cuando se calientan después de haber sido expuestos a radiación ionizante. Los activadores proveen dos tipos de centros: a) trampas para electrones y agujeros, los cuales pueden capturar portadores de carga en una barrera de potencial eléctrica (por un periodo de tiempo largo); b) centros termoluminiscentes que emiten luz cuando hay una recombinación electrón-agujero. Las trampas corresponden a niveles de energía permitidos en la región prohibida (entre la banda de valencia y la banda de conducción).

Durante la irradiación (Figura 1A), los electrones generados debido al proceso de ionización viajan de la banda de valencia a la banda de conducción y después caen en las trampas para ellos, mientras que los agujeros migran a las trampas asociadas a ellos. Cuando el material es calentado (Figura 1B), los electrones son liberados, regresando a la banda de conducción y migrando hacia una trampa para agujero que puede actuar como centro luminiscente. Si es así, la recombinación electrón-agujero es acompañada de la emisión de luz. La intensidad de la luz emitida como función de la temperatura, llamada "curva de brillo", es proporcional al número de electrones que fueron atrapados y el número de picos observados corresponde a las diferentes profundidades de trampa.



**Figura 1.** Proceso termoluminiscente (A) irradiación y (B) estimulación térmica (1 un electrón migra a la banda de conducción, 2 el electrón cae de la banda de conducción a una trampa para electrones, 3 un agujero migra a una trampa para agujeros, 4 el electrón es liberado de la trampa a la banda de conducción, 5 el electrón cae en una estado excitado, alrededor del defecto, transición no radiativa , 6 el electrón cae a una trampa para agujeros, se produce la recombinación electrón-agujero, acompañada de emisión de luz).

La teoría cinética de primer orden basada en el modelo estructura de bandas fue propuesta por Randall y Wilkins (Att 86) para describir cada pico individual en la curva de brillo. Esta teoría considera que todos los electrones que escapan de trampas se recombinan y emiten luz y el tiempo que se mantienen en la banda de conducción es depreciable. la probabilidad de escape de los electrones por unidad de tiempo,  $p$ , como una función de la temperatura,  $T$ , sigue una distribución estadística de Boltzman y está descrita por la siguiente ecuación (Att 86):

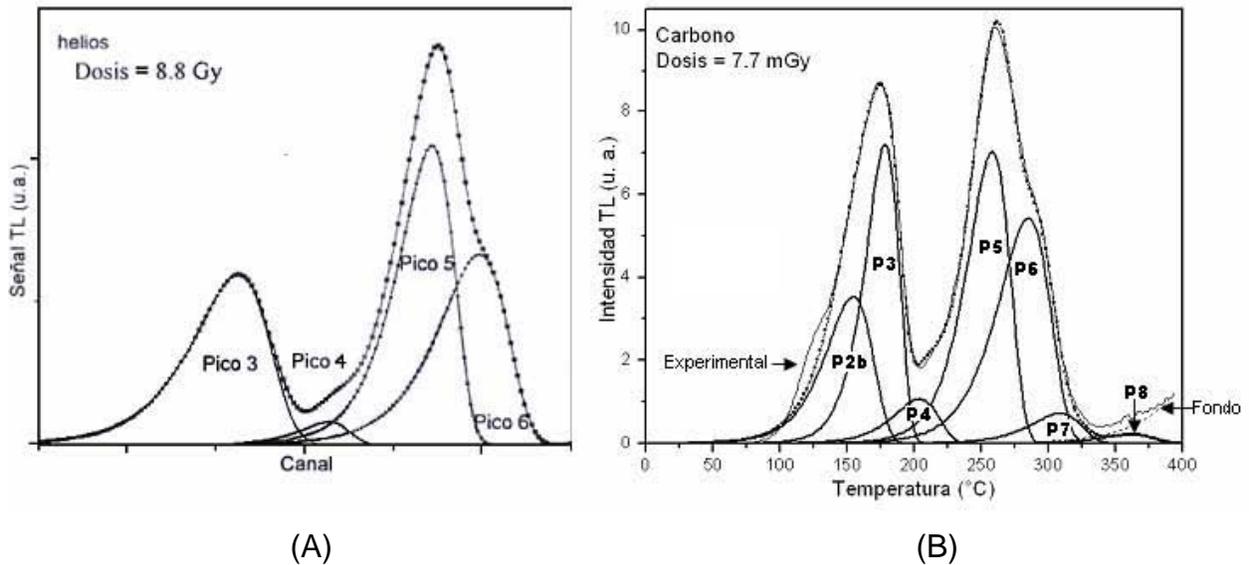
$$p = \frac{1}{\tau} = \alpha e^{-E/kT}, \quad (1.2)$$

donde  $\tau$  es la vida media promedio en la trampa,  $\alpha$  es un factor de frecuencia,  $E$  es la energía de profundidad de la trampa y  $k$  es la constante de Boltzman.

La intensidad máxima ocurre a una temperatura  $T_m$ , relacionada con la rapidez de calentamiento  $q$  (K/s), tal que

$$\frac{E}{kT_m^2} = \frac{\alpha}{q} e^{-E/kT}, \quad (1.3)$$

En este trabajo se hizo la deconvolución de las curvas de brillo para separar los picos traslapados usando la teoría cinética de Randall y Wilkins. La figura 2 compara una deconvolución usual de una curva de brillo obtenida al irradiar con helio, con una deconvolución más estricta correspondiente a irradiación con carbono, esta última se escogió ya que se alcanza a apreciar el pico 8 en escala lineal.



**Figura 2.** Curva de brillo de CaF<sub>2</sub>:Tm (A) protocolo de deconvolución usual (Gal 03), (B) protocolo de deconvolución utilizado para el presente trabajo.

# CAPITULO II

## 2 Desarrollo Experimental

### 2.1 Preparación y lectura de los dosímetros

Se utilizaron dosímetros de  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  (conocido por el fabricante Harshaw/Bicron como TLD-300) de  $3.2 \times 3.2 \times 0.89 \text{ mm}^3$  cuya densidad es  $3.18 \text{ g cm}^{-3}$  (Att 86), todos del mismo lote. Dos dosímetros fueron irradiados por cada valor de dosis (irradiación con  $\gamma$  de  $^{60}\text{Co}$ ) y de fluencia (irradiación con iones). Los dosímetros fueron horneados en aire durante 1 hora a  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . La lectura de la señal TL se realizó a una temperatura ambiental controlada de  $19^\circ\text{C}$  dentro del laboratorio, aproximadamente 48 horas después de la irradiación, integrando desde la temperatura ambiental hasta  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  en una atmósfera de nitrógeno, usando un equipo lector Harshaw 3500. La rapidez de calentamiento fue de  $10 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$ .

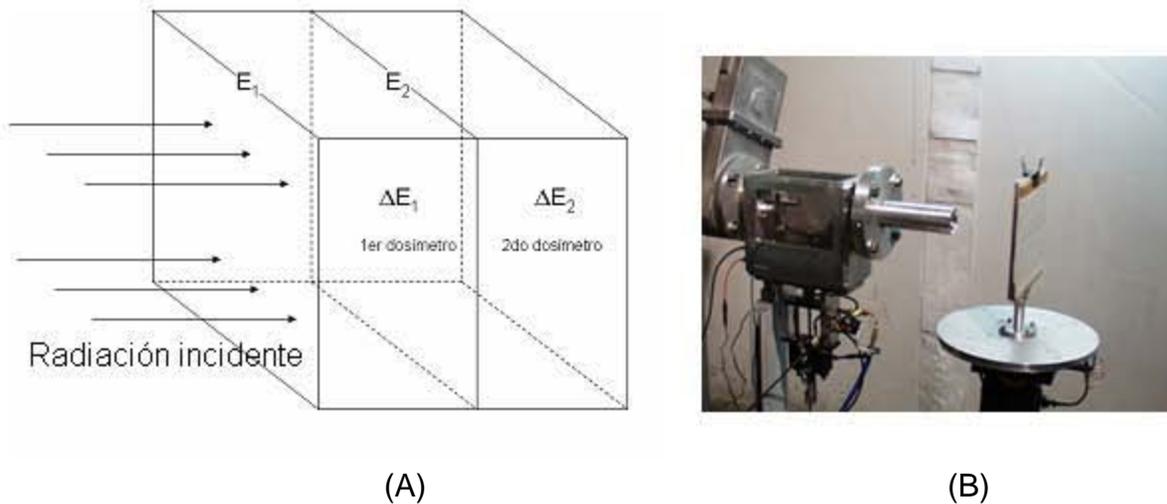
### 2.2 Proceso de irradiación

#### 2.2.1 Irradiación con rayos gamma de $^{60}\text{Co}$

Los dosímetros fueron irradiados usando una fuente calibrada, en el irradiador Gammacell 200 del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM, con rapidez de dosis en agua igual a  $0.58 \pm 0.03 \text{ Gy min}^{-1}$  (el día 18 de enero de 2006), para valores de dosis en  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  en el intervalo de 0.44 a 4.39 Gy (factor de conversión de dosis en agua a dosis en  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  igual a 0.8782 (Att 86)). Los dosímetros fueron cubiertos con un espesor de lucita de 0.4 cm, el cual provee las condiciones de equilibrio de partícula cargada (Mas 06).

## 2.2.2 Irradiación con iones

Los dosímetros fueron irradiados en aire usando haces de iones de hidrógeno de 25 y 40 MeV, helio de 75 y 120 MeV, carbono de 180, 300 y 480 MeV, oxígeno de 400 MeV y neón de 800 MeV, con fluencias entre  $10^5$  y  $10^8$  iones  $\text{cm}^{-2}$  del Radiation Effects Facility del ciclotrón de la Universidad de Texas A&M (TAMU) en la College Station, Texas, USA. Para los iones de hidrógeno de 40 MeV, helio de 120 MeV, carbono de 480 MeV y neón de 800 MeV, se colocaron pares de dosímetros superpuestos para conseguir energías incidentes distintas con la misma fluencia, es decir dos valores de LET, simultáneamente, como se muestra en la figura 3a. La tabla 1 muestra las energías incidentes, los valores de LET de entrada y promedio (en agua) evaluados para cada dosímetro y la dosis adsorbida en  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ . Las comparaciones entre la exposición directa a una energía del haz incidente similar a la exposición a una energía residual en un grupo de dosímetro sugieren que la superposición no afecta la señal TL o la curva de brillo medida (Mas 06a). La figura 3b muestra el soporte en donde se colocaron los dosímetros.



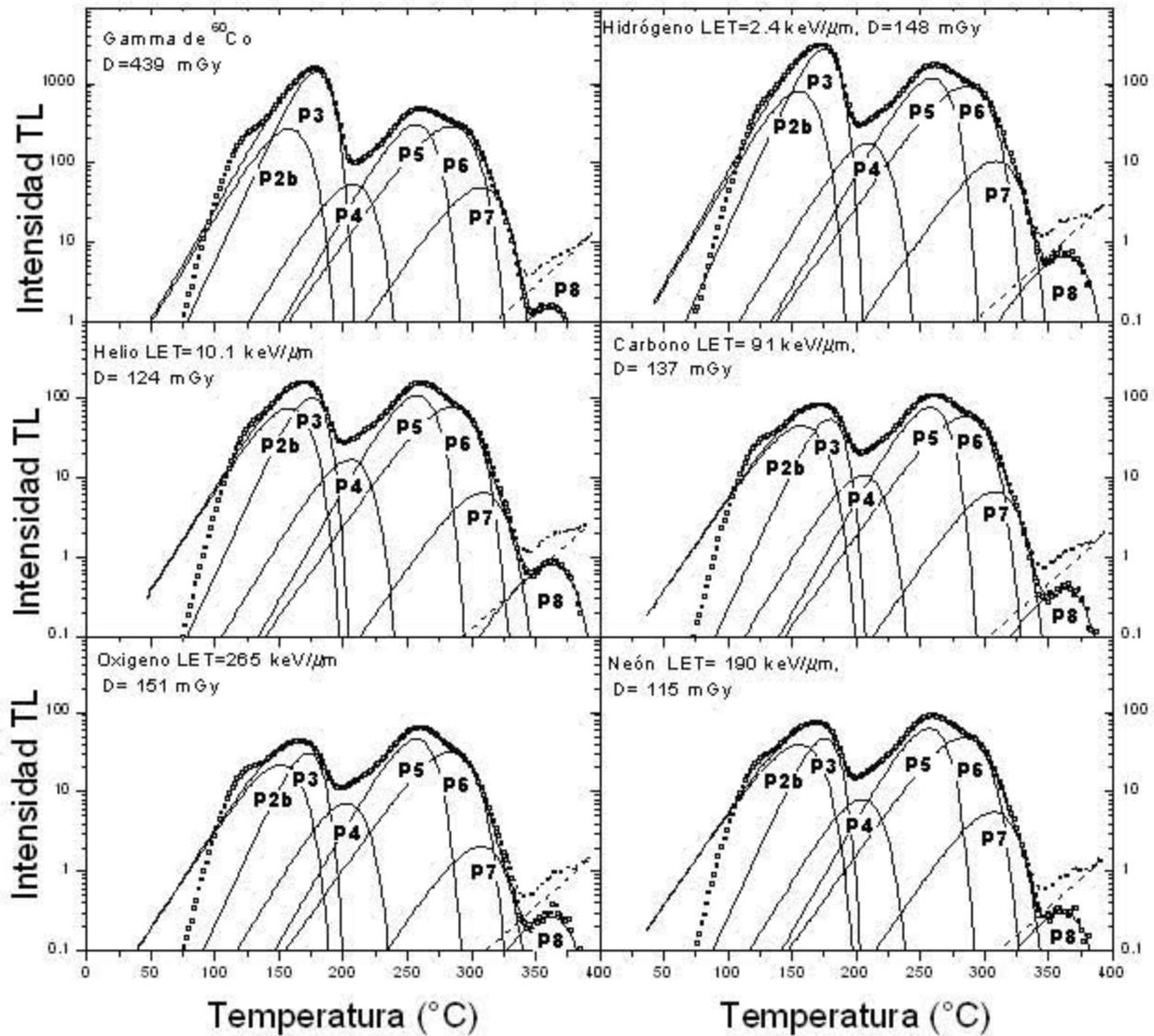
**Figura 3,** (A) Superposición de los dosímetros, (B) Arreglo experimental en el Ciclotrón de TAMU que muestra la salida del haz y el soporte en donde se colocaron los dosímetros.

La fluencia promedio sobre los dosímetros fue determinada mediante un arreglo de detectores de centelleo y su uniformidad fue verificada, exponiendo de manera independiente películas de tinte radiocrómico MD-55. En total se irradiaron con iones 100 dosímetros de  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ , dos para cada dosis.

**Tabla 1.** Datos de la irradiación.

ion	Energía (MeV)		LET (keV/ $\mu\text{m}$ )		Intervalo de Dosis (mGy)		
	nominal	superficial	entrada	promedio	min.	max.	
$^1\text{H}$	40	$E_1$	40	1.51	1.56	4.9	96.4
		$E_2$	36.6	1.62	1.69	5.3	104
$^3\text{He}$	25	$E_1$	25	2.21	2.42	7.4	148
		$E_2$	106.7	6.04	6.34	19.7	388
$^{12}\text{C}$	75	$E_1$	75	8.88	10.07	30.7	612
		$E_2$	480	53.54	60.3	7.7	187
$^{16}\text{O}$	180	$E_1$	180	122.56	224.0	25.6	1230
		$E_2$	352.7	68.35	91.0	11.3	275
$^{20}\text{Ne}$	800	$E_1$	800	149.87	190.2	19.5	570
		$E_2$	388.8	266.63	488.9	45.5	1332

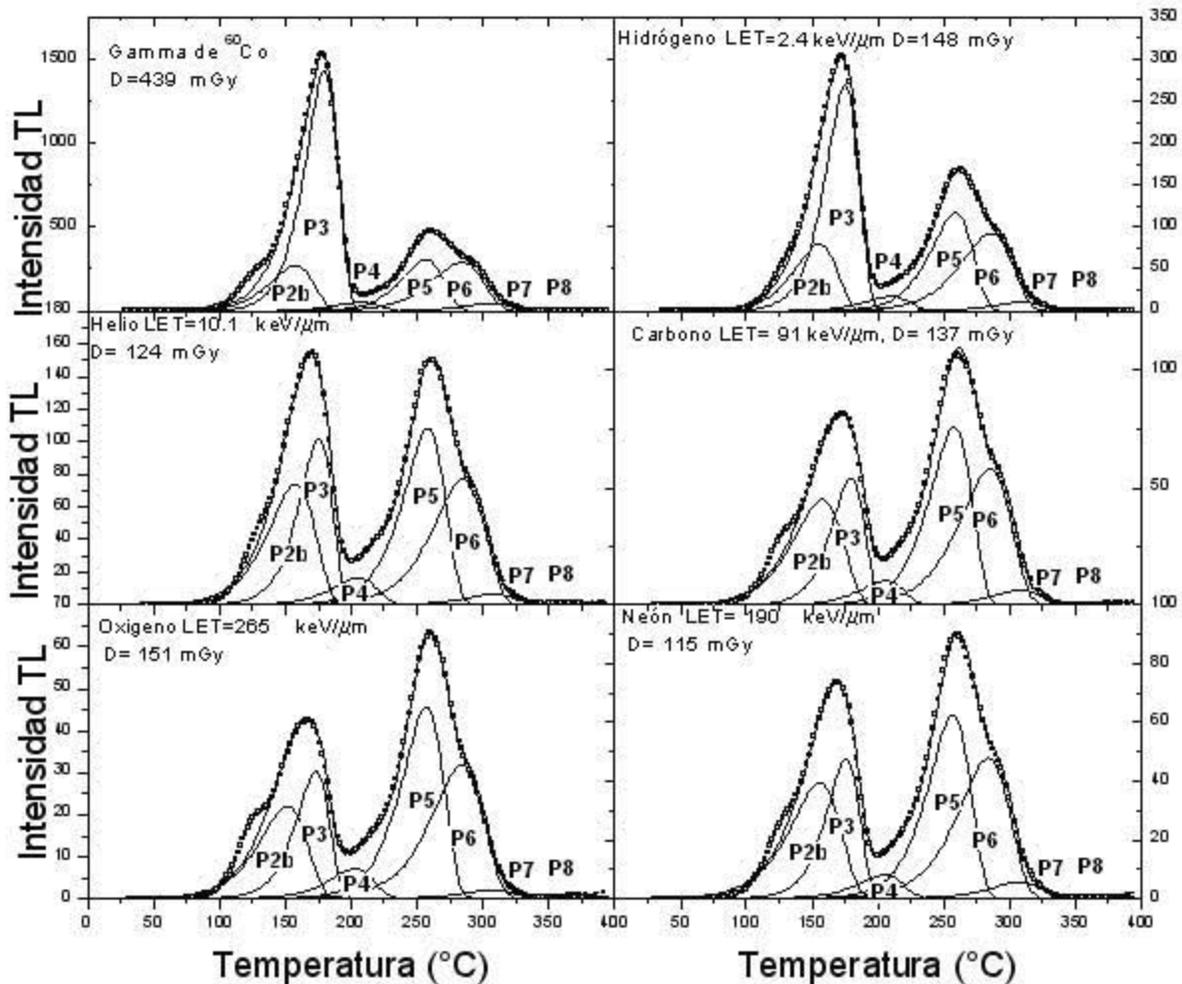
## 2.3 Deconvolución de las curvas de brillo



**Figura 4.** Curvas de brillo presentadas en escala semi-logarítmica para apreciar la calidad de la deconvolución y la resta del fondo, así como la respuesta TL del  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  a los distintos tipos de radiación: (■) Datos experimentales, (.....) fondo, (□) Datos experimentales menos el fondo, (—) Picos de brillo y (—) Suma de los picos de brillo.

La deconvolución de las curvas de brillo se realizó usando el programa CGCD de Harshaw que usa la aproximación de Podgorsak para la forma del pico basada en la teoría cinética de primer orden propuesta por Randall y Wilkins (Mos 83). Antes de la

deconvolución, la señal de fondo (señal que no proviene del cristal irradiado) fue sustraída de las curvas de brillo ajustando una constante + fondo exponencial con el programa Origin versión 6 como sigue:



**Figura 5.** Curvas de brillo presentadas en escala lineal, que permite apreciar los diferentes picos presentes en la deconvolución de las mismas, para los diferentes tipos de partículas. Se indica la dosis y la LET promedio equivalente en agua. (■) Datos experimentales, (---) fondo, (□) Datos experimentales menos el fondo, (—) Picos de brillo y (—) Suma de los picos de brillo.

En los datos experimentales, a baja temperatura la señal TL muestra fluctuaciones alrededor de un valor constante y su magnitud fue determinada como el promedio matemático de la señal a temperaturas menores que 50°C. El fondo a alta temperatura,

descrito como una función exponencial de la temperatura, fue ajustado con los datos arriba de 350°C.

Una vez sustraído el fondo, los datos fueron transportados al programa CGCD para su deconvolución. El programa define una función “constante + fondo exponencial”, la cual pasa a través de los datos después de que el usuario indica un punto en la región de baja y dos puntos en la región de alta temperatura de la curva de brillo. En este caso, al marcar los puntos requeridos por el programa, se obtuvo un fondo igual a cero. Para eliminar el pico 2 (pico entre 100 y 125 °C que se puede apreciar en las figuras 4 y 5), el programa requiere una indicación del valle entre éste y el pico 3. Con el fin de mantener una consistencia interna entre todas las curvas de brillo, se hicieron varias pruebas usando diferentes curvas para determinar una diferencia de temperatura relativa entre los picos 2 y 3 que fuera más o menos constante, independientemente de la curva se obtuvo una diferencia de temperatura igual a  $(31 \pm 3)$  °C lo cual fue usado para definir el valle. La integral neta de la curva de brillo después de estas sustracciones se refiere a la señal TL total.

Normalmente, se consideran 4 picos (Bue 99, Gal 03) en la deconvolución de la curva de brillo después de restar el pico 2 denotados como: pico 3 (P3), pico 4 (P4) pico 5 (P5) y pico 6 (P6). Basados en la experiencia previa del grupo de trabajo (Mer 04, Mas 06, Mas 06a), se graficaron las curvas en escala semi-logarítmica, como muestra la figura 4, para apreciar la presencia de los picos que no se pueden ver en una escala lineal (figura 5) y obtener un mejor ajuste en la deconvolución. Así, hemos observado 7 picos en la curva de brillo llamados 2b, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

**Tabla 2.** Parámetros de la deconvolución de la curva de brillo

Diferencia de temperatura con respecto del pico 3 (°C)							
Pico	FWHM (°C)	gamma	protón	Helio	Carbono	Oxigeno	neon
2b	libre	libre	libre	Libre	libre	libre	libre
3	29.88	libre	libre	Libre	libre	libre	libre
4	40.00	32±3	34±3	30±3	34±3	32±3	34±2
5	37.93	81±3	83±3	84±2	86±3	86±3	88±2
6	46.58	108±3	110±3	111±2	113±3	113±3	115±2
7	45.	132±3	134±3	135±2	137±3	137±3	138±2
8	45	185±3	187±3	188±2	190±3	190±3	192±2

Al realizar la deconvolución, primero se mantuvieron fijos los anchos de todos los picos. Pero, como se puede observar en la figura 4, la intensidad de luz emitida no crece exponencialmente como función de la temperatura para temperatura menor que 125°C, el ajuste obtenido no fue óptimo. Por ello, se tomo la decisión de dejar el ancho y la posición del pico 2b libre y así, obtener una mejor deconvolución. Por otro lado, para determinar las diferencias relativas entre la temperatura de los picos, primero se considero como referencia la posición del pico 3 dado por el programa y se observo un cambio significativo entre una curva y otra (variaciones de hasta 15°C). Basados en eso, hemos decidido tomar como referencia la posición de la máxima intensidad alrededor de 150°C de la curva de brillo obtenida experimentalmente (llamado usualmente pico3 (Bue 99)). La tabla 2 muestra los valores de los parámetros obtenidos, los cuales fueron escogidos después de una revisión preliminar basada en estudios previos (Gal 03). Como se puede observar, las diferencias relativas son constantes dentro de una variación de aproximadamente  $\pm 3^\circ\text{C}$ , independiente de la partícula. Se obtuvo en promedio, un FOM (discrepancia entre el ajuste y los datos experimentales) de  $1.68\% \pm 0.54\%$  para todas las curvas.

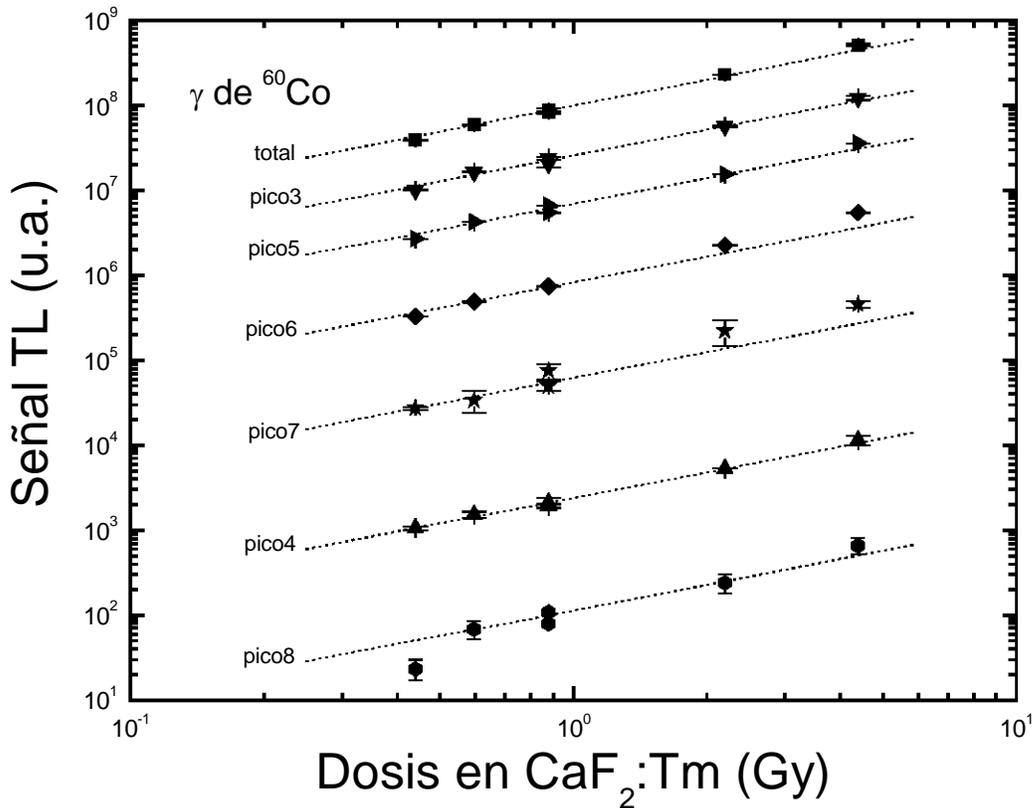
# CAPITULO III

## 3 Resultados y discusión

### 3.1 Respuesta TL

#### 3.1.1 Respuesta a radiación gamma de $^{60}\text{Co}$

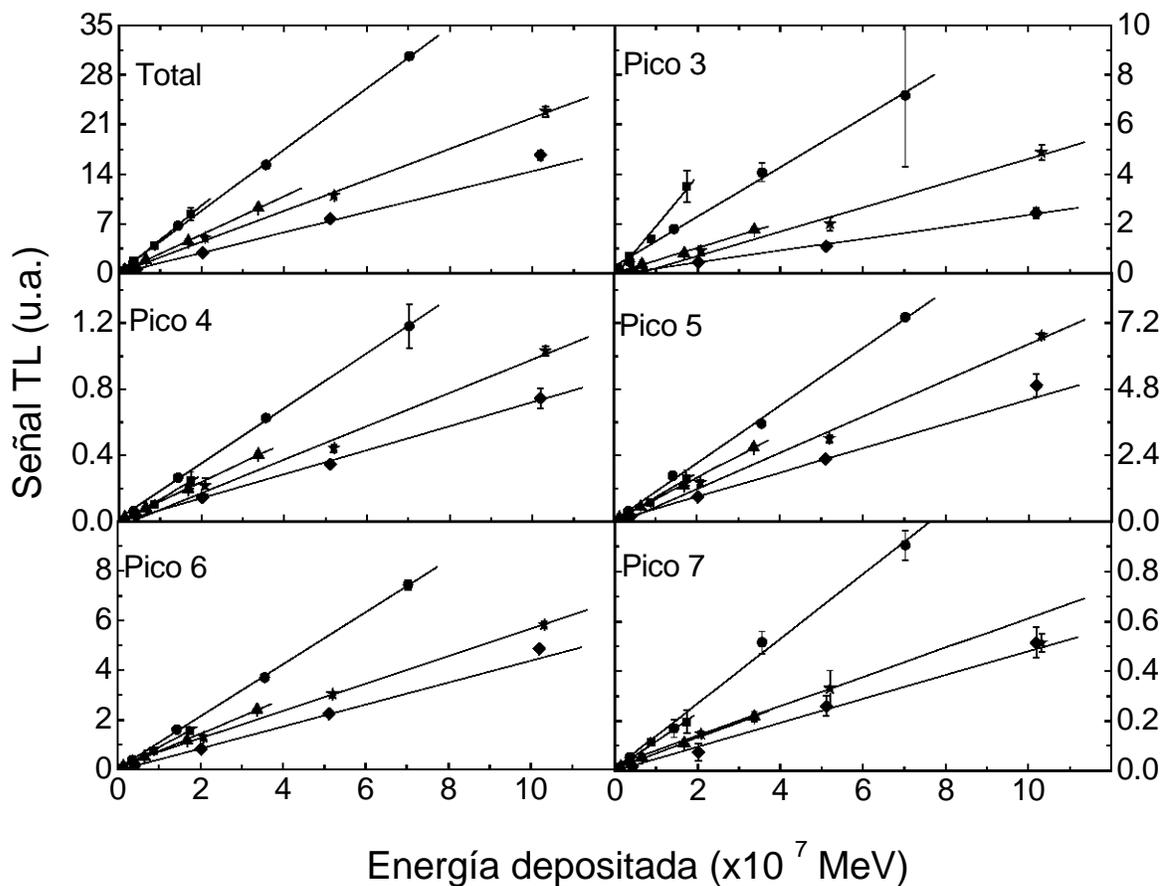
La figura 6 muestra la respuesta TL como función de la dosis para la señal total y los diferentes picos. Para mejorar la visualización del comportamiento de los distintos picos, se divide la respuesta de algunos picos por un factor



**Figura 6.** Respuesta TL como función de la dosis absorbida. Las líneas punteadas muestran un ajuste lineal.

Como se puede observar en la figura 6, la respuesta TL para los picos 3, 4 y 8 es lineal para todos los valores de dosis estudiados. Para valores de dosis alrededor de 4 Gy, la señal TL total y el pico 5 muestran ligeramente un comportamiento supralineal, mientras que los picos 6 y 7 son lineales hasta aproximadamente 2 Gy. La supralinealidad observada en la señal total es una consecuencia de la supralinealidad de los picos 5, 6 y 7.

### 3.1.2 Respuesta a iones



**Figura 7.** Respuesta TL como función de la energía depositada en el dosímetro: (■)  $^1\text{H}$ : 1.56 keV/ $\mu\text{m}$ , (●)  $^3\text{He}$ : 1.56 keV/ $\mu\text{m}$ , (▲)  $^{12}\text{C}$ : 60.3 keV/ $\mu\text{m}$ , (◆)  $^{16}\text{O}$ : 265 keV/ $\mu\text{m}$  y (★)  $^{20}\text{Ne}$ : 190 keV/ $\mu\text{m}$ . Las líneas representan una respuesta lineal.

Considerando que la luz emitida debe ser proporcional a la energía transferida al material durante la irradiación, hemos evaluado la respuesta TL de CaF<sub>2</sub>:Tm como una función de la energía depositada (fluencia x energía impartida x área del dosímetro). La energía impartida fue calculada como la integral del valor promedio del poder de frenado sobre la trayectoria del ion dentro del espesor irradiado del dosímetro, usando las tablas de poderes de frenado del SRIM 2003 versión 26 (Zie 03). Se desarrolló un programa en lenguaje Fortran para calcular la energía depositada por los iones en este material y este programa se presenta en el apéndice A. La figura 7 muestra la respuesta TL de CaF<sub>2</sub>:Tm como una función de la energía depositada para la señal total y los picos 3 al 7 para los cinco iones con energía incidente más alta (El primer valor de LET en caso de exposición superpuesta).

En la figura 7 se observa que la respuesta TL para la señal total y cada uno de los picos es una función lineal de la energía depositada para los iones de hidrógeno, helio, carbono y neón en el intervalo de fluencia estudiado. Para el oxígeno, las respuestas de los picos 3, 4 y 7 son lineales para todo el intervalo de energía estudiado, mientras que la señal total y los picos 5 y 6 son supralineales a energía depositada de aproximadamente 10<sup>8</sup> MeV. La supralinealidad observada en la señal total es una consecuencia de la supralinealidad y de la alta contribución de estos picos en la curva de brillo. Además, las diferencias observadas en las distintas pendientes de los ajustes lineales implican que la señal TL es una función de la densidad de ionización y / o del tipo de partícula.

### 3.2 Eficiencia relativa (ER)

La eficiencia TL para la señal total y cada pico, relativa a la respuesta a rayos gamma de <sup>60</sup>Co, fue obtenida de acuerdo con Horowitz (Hor 84):

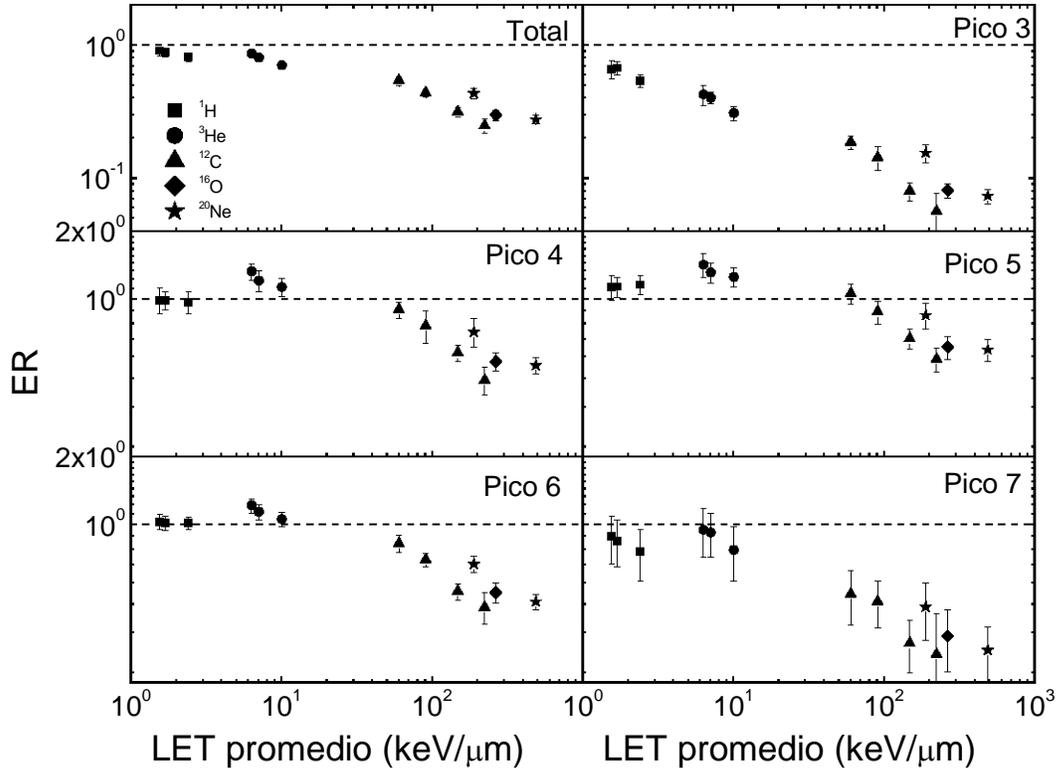
$$ER = \frac{R_{HCP}/D_{HCP}}{R_{\gamma}/D_{\gamma}}, \quad (3.1)$$

donde  $R_{HCP}$  y  $R_\gamma$  son la señal TL, por unidad de masa irradiada (MI), para irradiación con iones y rayos gamma, a dosis absorbida  $D_{HCP}$  y  $D_\gamma$ , respectivamente; en el intervalo de dosis en que la respuesta TL es lineal. La dosis absorbida en  $CaF_2:Tm$  expuesto a iones fue evaluada como la energía depositada (sección 3.1.2) dividida por la masa irradiada del dosímetro. Para la irradiación con rayos gamma, MI es la masa total del dosímetro. Para los iones, MI es obtenida de la siguiente manera: si el alcance (R) de la partícula incidente es mayor o igual que el espesor del dosímetro (ED), MI es igual a la masa total; si R es menor que ED entonces MI es igual a R (cm) x área del dosímetro ( $cm^2$ ) x densidad ( $g/cm^3$ ). Los valores de los alcances de las partículas fueron obtenidos de las tablas de poderes de frenado del SRIM 2003 versión 26 (Zie 03). La Tabla 3 contiene la ER medida para varios iones como una función de la LET para la señal total y los picos 3-7.

**Tabla 3.** Eficiencia Relativa a  $^{60}Co$

ion	LET	ER a $\gamma$ de $^{60}Co$					
	Prom.	Total	Pico3	Pico4	Pico5	Pico6	Pico7
$^1H$	1.56	0.90 $\pm$ 0.06	0.66 $\pm$ 0.11	0.99 $\pm$ 0.13	1.13 $\pm$ 0.14	1.03 $\pm$ 0.08	0.88 $\pm$ 0.21
	1.69	0.88 $\pm$ 0.06	0.67 $\pm$ 0.08	0.98 $\pm$ 0.09	1.13 $\pm$ 0.11	1.02 $\pm$ 0.08	0.85 $\pm$ 0.20
	2.42	0.81 $\pm$ 0.05	0.54 $\pm$ 0.06	0.97 $\pm$ 0.11	1.16 $\pm$ 0.11	1.01 $\pm$ 0.06	0.76 $\pm$ 0.20
$^3He$	6.34	0.86 $\pm$ 0.06	0.42 $\pm$ 0.07	1.32 $\pm$ 0.11	1.42 $\pm$ 0.17	1.21 $\pm$ 0.09	0.94 $\pm$ 0.23
	7.1	0.80 $\pm$ 0.05	0.40 $\pm$ 0.04	1.20 $\pm$ 0.12	1.31 $\pm$ 0.13	1.13 $\pm$ 0.09	0.92 $\pm$ 0.20
	10.07	0.70 $\pm$ 0.04	0.31 $\pm$ 0.04	1.13 $\pm$ 0.10	1.25 $\pm$ 0.12	1.06 $\pm$ 0.08	0.77 $\pm$ 0.21
$^{12}C$	60.3	0.54 $\pm$ 0.04	0.19 $\pm$ 0.02	0.89 $\pm$ 0.07	1.06 $\pm$ 0.11	0.82 $\pm$ 0.07	0.49 $\pm$ 0.13
	91.0	0.44 $\pm$ 0.03	0.14 $\pm$ 0.03	0.76 $\pm$ 0.12	0.88 $\pm$ 0.10	0.70 $\pm$ 0.05	0.45 $\pm$ 0.11
	148.2	0.31 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.01	0.58 $\pm$ 0.05	0.67 $\pm$ 0.07	0.51 $\pm$ 0.04	0.30 $\pm$ 0.08
	224.0	0.25 $\pm$ 0.03	0.06 $\pm$ 0.02	0.44 $\pm$ 0.06	0.54 $\pm$ 0.06	0.43 $\pm$ 0.07	0.27 $\pm$ 0.14
$^{16}O$	265.1	0.30 $\pm$ 0.03	0.08 $\pm$ 0.01	0.53 $\pm$ 0.05	0.61 $\pm$ 0.07	0.50 $\pm$ 0.05	0.32 $\pm$ 0.10
$^{20}Ne$	190.2	0.43 $\pm$ 0.04	0.15 $\pm$ 0.02	0.71 $\pm$ 0.10	0.85 $\pm$ 0.11	0.67 $\pm$ 0.05	0.43 $\pm$ 0.12
	488.9	0.28 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.01	0.51 $\pm$ 0.04	0.60 $\pm$ 0.07	0.46 $\pm$ 0.04	0.28 $\pm$ 0.08

La figura 8 presenta la ER medida para varios iones como una función de la LET para la señal total y los picos 3-7.



**Figura 8.** Eficiencia relativa (ER) como una función de la LET promedio en agua, para la señal total y los picos 3 al 7.

Como se puede observar, la ER para la señal total, los picos 3 y 7 decrece monótonicamente con la LET desde un valor máximo menor que 1 a los valores de LET más bajos. Para los picos 4-6 la ER vale 1 para LET bajos, alcanza un máximo mayor que 1 y después disminuye con la LET. De acuerdo con Hoffmann y Prediger (Hof 83) la eficiencia relativa para el pico 5 es una constante para valores de LET menores o igual a 30 keV/μm. Tal resultado no se observa en este trabajo. Además, la ER no se unifica como una función de la LET como se reporta en (Hof 83) y es una función del tipo de partícula, lo cual concuerda con lo reportado por Buenfil (Bue 99).

# CAPÍTULO IV

## 4 Conclusiones

Se ha medido la respuesta TL y la eficiencia relativa de  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  expuesto a 5 iones de diferentes energías. Se siguió un protocolo estricto para la deconvolución de las curvas de brillo en sus 7 picos (2b, 3, 4, 5, 6, 7, 8).

Se observó que la respuesta TL es una función lineal de la energía depositada para todos los iones excepto para el oxígeno cuyo valor de LET es mayor. También, se ha observado que la señal TL depende de la LET y del tipo de partícula.

Para evaluar la eficiencia TL relativa, hemos medido la respuesta TL a rayos gamma de  $^{60}\text{Co}$ , encontrando que los picos 6 y 7 son supralineales a partir de aproximadamente 2 Gy. Mientras que el pico 5 y la señal total son levemente supralineales a partir de aproximadamente 4 Gy. Los picos 3, 4 y 8 son lineales para todos los valores de dosis estudiados.

Se midió la eficiencia relativa para la señal total y para cada uno de los picos de la curva de brillo, observando un comportamiento diferente para la señal total y los picos 3 y 7 con respecto a lo observado para los picos 4 a 6. Los resultados muestran que la LET no es el único parámetro del cual depende la eficiencia relativa, sino que también depende del tipo de partícula.

La deconvolución realizada en este trabajo muestra una independencia con el campo de radiación, si se mantiene fijos los anchos de los picos y la diferencia de temperatura relativa entre ellos. Además, permite hacer una mejor comparación de la respuesta a diferentes tipos de partícula.

Por otro lado, estos resultados indican que, el  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  puede ser usado en campo de radiación desconocido para identificar el tipo de partícula si se hace un análisis detallado de cada pico individual en la curva de brillo.

## 6 Apéndice A

### 6.1 Programa para calcular la energía depositada en $\text{CaF}_2:\text{Tm}$

Program LET promedio

!2 Este programa calcula la dosis absorbida y la LET(keV/micra) promedio, equivalente en agua, de una partícula mientras penetra en un dosímetro de espesor t1

C\*\*\*\*\* Datos de entrada

C\*\*\*\*\* AA=tipo de partícula

C\*\*\*\*\* ene(0)= energía inicial del ion en MeV

C\*\*\*\*\* t1=espesor del dosímetro en g/cm<sup>2</sup>

C\*\*\*\*\* t2= espesor del mylar

C\*\*\*\*\* dx=diferencial de espesor

C\*\*\*\*\* rd=densidad del dosímetro en g/cm<sup>3</sup>

C\*\*\*\*\* letMY=LET en mylar

C\*\*\*\*\* Un archivo de datos con el poder de frenado en  $\text{CaF}_2$  (MeV/g/cm<sup>2</sup>) y en agua(keV/micra) y el alcance (g/cm<sup>2</sup>) de las

C\*\*\*\*\* partículas en el dosímetro

C\*\*\*\*\* Un archivo de datos con el poder de frenado en mylar(MeV/g/cm<sup>2</sup>) de las partículas utilizadas

C\*\*\*\*\* Un archivo de Fluencias de partículas en cm<sup>-2</sup>

!14

IMPLICIT NONE

real\*4 ene(33000),slif(33000),letmy,t2,t1,Smy(133),E5(133)

real\*4 sagua(33000),alcalif(33000),ee(133),S1(133),dx,ene0,prom3

real\*4 S2(133),R(133),pend,prom1,prom2,suma1,suma2,suma3,b1(8001)

real\*4 a1(8001),a2(16000),a3(24000),b3(24000),a,b,c,b2(16001)

real\*4 E1,E2,a4(32000),b5,d,prom4,suma4,E4

real\*4 E3,pend1,b4(32000),F(15),D1(15),D2(15),D3(15),D4(15)

integer\*2 j,m,i,n,k,var1,var2,var3

Character\*25 entrada

Character\*50 salida

Character\*38 promedio

Character\*55 mylar

Character\*65 fluencia

Character\*68 dosis

- 30 write(\*,\*)'¿Cual es la energia inicial?'
- READ(\*,\*) ene0
- write(\*,\*)'¿Cual es el archivo de LET en mylar?'
- READ(\*,22) mylar
- 22 format(A55)
- write(\*,\*)'¿Cual es el espesor del mylar en g/cm\*2?'
- READ(\*,\*) t2
- write(\*,\*)'¿cual es el archivo de LET en liF?'
- READ(\*,18) entrada
- 18 format(A25)
- write(\*,\*)'¿Cual es el archivo de fluencia?'
- READ(\*,27) fluencia
- 27 format(A65)
- write(\*,\*)'¿cual es el archivo de LET que sale?'
- READ(\*,35) salida
- 35 format(A50)
- write(\*,\*)'¿donde se guardan los valores de LET promedio?'
- READ(\*,40) promedio
- 40 format(A38)
- write(\*,\*)'¿donde se guardan los valores de dosis?'
- READ(\*,39) dosis
- 39 format(A68)

```

write(*,*)'¿cual es el espesor del dosimetro en g/cm*2?'
READ(*,*) t1
open(unit=10,name=entrada,status='old')
open(unit=15,name=mylar,status='old')
open(unit=19,name=fluencia,status='old')
open(16,file=salida)
open(17,file=promedio)
open(18,file=dosis)

var1=0
do n=1,131
read(15,*,end=200) E5(n),Smy(n)
var1=var1+1
end do
200 continue
    do n=2,var1
        if((ene0.lt.E5(n)).and.(ene0.ge.E5(n-1))) then
            pend1=(Smy(n-1)-Smy(n))/(E5(n-1)-E5(n))
            b5=Smy(n)-pend1*E5(n)
            letmy=pend1*ene0+b5

            ene(1)=ene0-(letmy*t2)
        endif
    end do

dx=t1/6000

var2=0
do j=1,131
read(10,*,end=300) ee(j),S1(j),S2(j),R(j)
var2=var2+1

```

```

end do
300 continue
Do m=1,24000
    do j=2,var2
        if((ene(m).lt. ee(j)).and.(ene(m).ge. ee(j-1))) then
            pend=(S1(j-1)-S1(j))/(ee(j-1)-ee(j))
            b=S1(j)-pend*ee(j)
            slif(m)=pend*ene(m)+b

            pend=(S2(j-1)-S2(j))/(ee(j-1)-ee(j))
            b=S2(j)-pend*ee(j)
            sagua(m)=pend*ene(m)+b

            pend=(R(j-1)-R(j))/(ee(j-1)-ee(j))
            b=R(j)-pend*ee(j)
            alcalif(m)=pend*ene(m)+b

            ene(m+1)=ene(m)-(slif(m)*dx)
        endif
    end do
end do
do m=1,24000
    if(ene(m).gt.0) write(16,20) ene(m),slif(m),sagua(m),alcalif(m)
end do
20 format(4f14.4)

var3=0
do k=1,15
read(19,*,end=400) F(k)
var3=var3+1
end do

```

```
400  continue
```

```
    a=0
```

```
    b=0
```

```
    c=0
```

```
    d=0
```

```
    suma1=0
```

```
    suma2=0
```

```
    suma3=0
```

```
    suma4=0
```

```
do i=1,24000
```

```
    if(i.le.6000) then
```

```
        a1(i)=slif(i)*dx
```

```
        b1(i)=sagua(i)*dx
```

```
        suma1=a1(i)+suma1
```

```
        a=b1(i)+a
```

```
        prom1=a/t1
```

```
        E1=ene(1)-suma1
```

```
    if(E1.le.0.01.and.i.eq.6000)then
```

```
        prom1=a/alcalif(1)
```

```
        if(i.le.6000) write(*,*) 'no pase el dosimetro uno'
```

```
        write(17,70) ene(1),prom1
```

```
    endif
```

```
endif
```

```
    if(i.gt.6000.and.i.le.12000) then
```

```
        a2(i)=slif(i)*dx
```

```
        b2(i)=sagua(i)*dx
```

```
        suma2=a2(i)+suma2
```

```

b=b2(i)+b
  prom2=b/t1
  E2=E1-suma2

  if(E2.le.0.01.and.i.eq.12000)then
    prom2=b/alcalif(6001)
  if(i.gt.6000.and.i.le.12000) write(*,*) 'no pase el dosimetro dos'
    write(17,70)suma1,E1,prom1,prom2

  endif
endif

if(i.gt.12000.and.i.le.18000)then
  a3(i)=slif(i)*dx
  b3(i)=sagua(i)*dx
  suma3=a3(i)+suma3
  c=b3(i)+c
  prom3=c/t1
  E3=E2-suma3
  if(E3.le.0.01.and.i.eq.18000)then
    prom3=c/alcalif(12001)
  if(i.gt.12000.and.i.le.18000) write(*,*)'no pase el dosimetro tres'
    write(17,70)suma1,suma2,E2,prom1,prom2,prom3

  endif
endif

if(i.gt.18000.and.i.le.24000)then
  a4(i)=slif(i)*dx
  b4(i)=sagua(i)*dx
  suma4=a4(i)+suma4

```

```

        d=b4(i)+d
        prom4=d/t1
        E4=E3-suma4
        if(E4.le.0.01.and.i.eq.24000)then
            prom4=d/alcalif(18001)
        if(i.gt.18000.and.i.le.24000)write(*,*)'no pase el dosimetro 4'
            write(17,70)suma1,suma2,suma3,E3,prom1,prom2,prom3,prom4

```

```

        endif
    endif

```

50 Do k=1,var3

```

        D1(k)=(1.6022E-7*F(k)*suma1)/t1

```

```

        if(E1.le.0.01.and.k.le.var3.and.i.eq.6000)then
            D1(k)=(1.6022E-7*F(k)*ene(1))/alcalif(1)
            write(18,80)F(k),D1(k)
        if(E1.le.0.01.and.k.ge.var3.and.i.ge.6000)stop
        endif

```

```

        D2(k)=(1.6022E-7*F(k)*suma2)/t1
        if(E2.le.0.01.and.k.le.var3.and.i.eq.12000)then
            D2(k)=(1.6022E-7*F(k)*E1)/alcalif(6001)
            write(18,80)F(k),D1(k),D2(k)
        if(E2.le.0.01.and.k.ge.var3.and.i.ge.12000)stop
        endif

```

```

        D3(k)=(1.6022E-7*F(k)*suma3)/t1
        if(E3.le.0.01.and.k.le.var3.and.i.eq.18000)then
            D3(k)=(1.6022E-7*F(k)*E2)/alcalif(12001)
            write(18,80)F(k),D1(k),D2(k),D3(k)

```

```

        if(E3.le.0.01.and.k.ge.var3.and.i.ge.18000)stop
        endif

D4(k)=(1.6022E-7*F(k)*suma4)/t1
        if(E4.le.0.01.and.k.le.var3.and.i.eq.24000)then
D4(k)=(1.6022E-7*F(k)*E3)/alcalif(18001)
                write(18,80)F(k),D1(k),D2(k),D3(k),D4(k)
        if(E4.le.0.01.and.k.ge.var3.and.i.ge.24000)stop
        endif
        end do
    end do
do k=1,var3
write(18,80) F(k),D1(k),D2(k),D3(k),D4(k)
    end do
write(17,70)suma1,suma2,suma3,suma4,prom1,prom2,prom3,prom4
80  format(8f14.3)
70  format(4f14.5)

    close(10)
    close(15)
    close(16)
    close(16)
    close(18)
    close(19)
end program

```

## REFERENCIAS

- (Att 86) Attix F.H., Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, John Wiley and Sons, Inc. (1986).
- (Bos 95) Bos A. J. J., De Jong R. W. and K. Meijvogel, Effects of type of radiation on glow curve and thermoluminescence emission spectrum of CaF<sub>2</sub>:Tm, Radiat Meas. **24**(4) 401-405 (1995).
- (Bue 99) Buenfil A. E., Gamboa de Buen I., Ruiz-Trejo C., Olvera C., Rodríguez-Villafuerte M., Rogers R. C. and Brandan M. E., Respose of TLD-300 to Heavy Charged Particles, Radiat. Prot. Dosim. **84** (1-4) 273-273 (1999).
- (Gal 03) Galván-Espinoza H. A. Respuesta de dosímetros termoluminiscentes TLD-300 (CaF<sub>2</sub>:Tm) a un campo mixto de iones de Helio y Protones, Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México (2003).
- (Gam 96) Gamboa-deBuen I. Medida de la respuesta termoluminiscente (Eficiencia y Supralinealidad) de LiF: Mg,Ti expuesto a radiación altamente ionizante, Tesis de doctorado UNAM, México (1996).
- (Hof 83) Hoffmann W. and Prediger B., Heavy particle dosimetry with high temperature peaks of CaF<sub>2</sub>:Tms and LiF phosphors, Radiat. Prot. Dosim. **6** (1-4) 149-152 (1983).
- (Hof 99) Hoffmann W., Bienen J., Filges D. and Schmitz Th., TLD-300 Dosimetry in a 175 MeV proton beam, Radiat. Prot. Dosim. **85** (1-4) 341-343 (1999).
- (Hor 84) Horowitz, Y. S. Thermoluminescence and Thermoluminiscent Dosimetry Vol. I. CRC Press, Inc., Boca Ratón , Florida (1984).
- (Lon 96) Loncol Th., Hamal M., Denis J. M., Vynkier S., Wambersie A. and Scaliet P., Response Analysis of TLD-300 Dosimeters in Heavy-Particle Beams, Phys. Med. Biol. **41** 1665-1678 (1996).
- (Mas 06) Massillon-JL G., Gamboa-deBuen I. and Brandan M. E., Onset of supralinear response in TLD-100 exposed to <sup>60</sup>Co gamma-rays J. Phys. D: Appl. Phys. **39** 262–268 (2006).

- (Mas 06a) Massillon-JL G., Gamboa-deBuen I. and Brandan M. E., LET and dose dependence of TLD-100 glow curve after exposure to intermediate-energy ions, Radiat. Prot. Dosim. Advance Access Published doi:10.1093/rpd/nci534 (Marzo 2006).
- (Mer 04) Mercado-Uribe H. and Brandan M. E., Thermoluminescent response of TLD-100 irradiated with 20 keV electrons and the use of radiochromic dye films for the fluence determination, Nucl. Instr. Meth. B **222** 201-212 (2004).
- (Mos 83) Moscovitch M, Horowitz Y S and Oduko J., LiF thermoluminescence dosimetry via computerized first order kinetics glow curve analysis Radiat. Prot. Dosim. **6** 157-159 (1983).
- (Sha 88) Shachar B. B., and Horowitz Y. S., Dosimetric Characterization of the High Temperature Peaks of LiF:Mg,Ti and CaF<sub>2</sub>:Tm Using Computerized Glow Curve Deconvolution, Radiat. Prot. Dosim. **22** (2) 87-96 (1988).
- (Wan 89) Wang T.K., Hsu. P. C. and Weng P.S., Application of CaF<sub>2</sub>:Tm (TLD-300) dosimeter to the discrimination between Alpha, Beta and Gamma radiation, Appl. Radiat. Isot. **40** 329 (1989).
- (Zie 03) Ziegler J. F. and Biersack J. P., SRIM-2003, versión 2003.26 disponible en: [www.srim.org](http://www.srim.org) (Marzo 2006).