UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EL BORATO DE LITIO ACTIVADO CON MANGANESO COMO DOSIMETRO DE RADIACION IONIZANTE

ESTE LIBRO NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

T E S I S

Que para obtener el título de

F I S I C O

p r e s e n t a

SERGIO ALVA LOZANO

México, D. F 1970

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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.

A mis padres

A mi esposa e hija.

AGRADECIMIENTOS.

La presente tesis fué realizada en el laboratorio de Bajo Nivel Radiactivo del Instituto de Física de la UNAM, bajo la dirección del Fís. Augusto Moreno y Moreno a quien quiero expresar mi agradecimiento por sus preciados consejos y valiosa ayuda.

Agradezco al Laboratorio Nuclear del Centro de Materiales de la UNAM por su cooperación con el préstamo del equipo termoluminiscente utilizado para este trabajo, y por la gentileza de haber facilitado el uso de la Unidad Gammacell; así como al Ing. Manuel Navarrete por su cooperación en la experimentación de este trabajo.

A los directivos del Depto. de Radioterapia de la Unidad de Cancerología y al Fís. Víctor M. Tovar, que facilitaron el uso de los aparatos de irradiación, y cooperación en el desarrollo de la parte experimental de esta tesis.

Asimismo agradezco a la Comisión Nacional de Energía Nuclear la ayuda económica que me brindó para la impresión de esta tesis.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	1
I.- MODELOS FISICO Y MATEMATICO DEL FENOMENO TERMOLUMINISCENTE.	3
II.- INSTRUMENTACION ASOCIADA.	12
III- EXPERIMENTOS REALIZADOS. CONCLUSIONES Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	17
APENDICE I .- MODELO MATEMATICO DE RANDALL Y WILKINS.	78
APENDICE II .- MODELO MATEMATICO DE CAMERON Y ZIMMERMAN.	81
APENDICE III.- ANALISIS CRISTALOGRAFICO CON RAYOS X DE ALGUNAS MUESTRAS USADAS EN LA EXPERIMENTACION.	83
BIBLIOGRAFIA.	84

INTRODUCCION

El uso creciente de las máquinas de radiación y el de fuentes radiactivas, va aunado a la necesidad de desarrollar la dosimetría de radiación asociada, siendo uno de los métodos más modernos para la determinación de dósis de radiación absorbida, el de la dosimetría termoluminiscente.

Utilizando la información obtenida por Becquerel, Curie[1], Wick[2], Lyman[3], y otros, Daniels[4] propuso el uso del fenómeno termoluminiscente en la dosimetría de la radiación. Desde entonces (1950), se ha desarrollado un rápido progreso en dosimetría termoluminiscente, creciendo día a día el interés sobre este sistema para medir dósis de radiación, hecho que se refleja en la cantidad de reportes publicados, en la cantidad de dosímetros que se producen en el comercio y los diferentes equipos creados para medir termoluminiscencia.

Entre esta gran cantidad de trabajos anteriormente mencionados, se han reportado últimamente, una serie de estudios[5],[6],[7],[8] que mencionan al borato de litio como dosímetro termoluminiscente ; sin embargo, existe una cierta divergencia entre esos reportes.

Efectivamente, existen trabajos[7] que indican que este fósforo[9], presenta en su espectro termoluminiscente, tres picos principa-

les; en 80°C, 180°C y 220°C; otros[12] reportan solo dos picos: 55°C y 200°C, y varios más[8] mencionan el pico de 80°C y otro en 200°C el cual tiene componentes que hacen que éste cambie de posición -entre 180°C y 210°C- según sea la dósis recibida.

Este hecho, sumado al de obtener reproducibilidad entre lotes de material preparados, nos llevó a realizar el estudio del borato de litio activado con manganeso como dosímetro termoluminiscente de radiación ionizante.

En esta tésis, se hará una revisión de los modelos (capítulo I), que explican el fenómeno de la termoluminiscencia, y se abordará posteriormente, el caso de la descripción detallada del modo de preparar el $Li_2B_4O_7$:Mn, información que aparece incompleta en la bibliografía consultada.

En los últimos capítulos de este trabajo, se señalan los experimentos realizados y las conclusiones de los mismos.

Así pués, el objetivo principal que aquí se persigue, es buscar la forma de preparar un material que ofrezca un buen comportamiento como dosímetro termoluminiscente. Por otro lado, la extensa información obtenida, podrá servir como base de referencia para estudios posteriores.

CAPITULO I

MODELOS FISICO Y MATEMATICO DEL FENOMENO TERMOLUMINISCENTE

Termoluminiscencia es el término usado para la designación de la luz producida por un material (fósforo) previamente expuesto a radiación ionizante, cuando su temperatura aumente en forma contibuadamente creciente[10]. La base del fósforo[11], la constituye una red cristalina que se hace luminiscente al incorporarle ciertas impurezas.

El fenómeno de la termoluminiscencia, aunque relativamente de fácil observación, carece de una teoría físico-química adecuada, y la explicación que a la fecha es más ampliamente aceptada, se limita para el caso de cristales sencillos en su estructura, tales como los halogenuros alcalinos.

Como se sabe, la estructura de este tipo de sales, consiste en iones alcalinos e iones halógenos que forman una malla cúbica centrada en la cara. Esta situación es representada bidimensionalmente en la figura I.

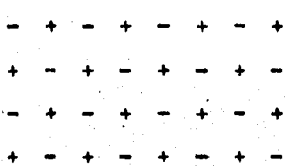


FIGURA I.

Ahora bien, esta es una estructura ideal e inexistente, pués se ha observado, que los cristales reales presentan muchos tipos de imperfecciones, encontrándose por ejemplo, que existen lugares en donde falta ya sea un ión alcalino, o uno halógeno. Estas "vacancias", equivalen a cargas localizadas de signo contrario; así pués, para el caso de una vacancia de ión halógeno, habrá una deficiencia de carga negativa que se comporta como un campo eléctrico coulombiano[13] que funciona a manera de "trampa" de cargas negativas (figura II).

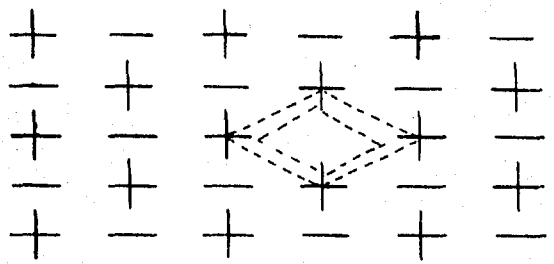


FIGURA II.

La adición de impurezas, es para que estos átomos, que sustituyen un ión en la red cristalina, puedan proporcionar electrones que al ser atrapados en las vacancias de iones negativos, pasen a formar lo que se conoce como centro F.

En la red cristalina, la energía que puede tener un electrón, puede variar en forma contínua dentro de las bandas permitidas A y B (figura III), que se encuentran llenas y que constituyen la llamada banda de valencia[11], (modelo de bandas).

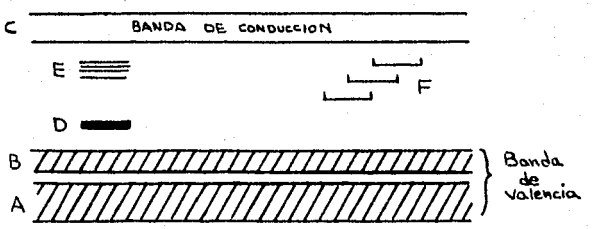


FIGURA III.

Más arriba de la banda de valencia, tenemos una banda vacía C; ésta recibe el nombre de banda de conducción[14], puesto que al aumentar la temperatura, por ejemplo, los electrones que se hallan en el estado localizado en el tope de la banda de valencia, se excitan térmicamente a estados en el nivel vacío (dejando agujeros en la banda de valencia) donde pueden contribuir a la conducción eléctrica.

Los átomos del activador, o también las imperfecciones propias de la red cristalina, dan lugar a estados electrónicos de niveles de energía intermedios a las bandas B y C, como se ilustra en la figura III, en donde tales estados están representados por las letras D, E y F, esta última correspondiente a centros F.

Cuando un "fósforo" se expone a radiación ionizante, a una temperatura suficientemente baja, muchos de los electrones que inicialmente se encontraban en la banda de valencia, son liberados pasando a la banda de conducción en donde vagarán hasta ser capturados en los niveles F, que normalmente se encuentran vacíos.

Así pués, tenemos ahora a los electrones en estados metaestables de energía, los correspondientes a los centros F, en donde perma-

necen atrapados durante un gran período de tiempo si el fósforo se mantiene a temperaturas suficientemente bajas.

Los electrones excitados que se encuentran en la banda de conducción, tienden a regresar a su estado base, y al producirse este retorno, se origina la emisión de un fotón luminoso. El paso del electrón de la banda C, a la banda de valencia, puede tener lugar por medio de pasos intermedios correspondientes a niveles de energía que se encuentran entre dichas bandas.

Si los electrones se encuentran atrapados en niveles F, necesitarán de energía para poder liberarse y pasar a la banda de conducción nuevamente teniendo así, otra oportunidad de regresar a su estado base con la correspondiente emisión luminosa.

Cuando la energía a la que nos hemos estado refiriendo, es proporcionada por el aumento paulatino de temperatura, la emisión luminosa consecuente, recibe el nombre de termoluminiscencia.

Después de que las trampas han sido vaciadas por calentamiento del fósforo, a temperaturas suficientemente altas, el material usado una vez enfriado, vuelve generalmente a su estado físico original y podrá ser nuevamente utilizado como dosímetro para otra exposición de radiación ionizante.

A la fecha, son dos los modelos matemáticos propuestos para la explicación del fenómeno de termoluminiscencia. Uno se refiere a la intensidad de los picos característicos de las curvas termoluminiscentes y el otro se refiere al número de trampas llenas a cualquiera exposición.

El modelo referente a la intensidad de la luminiscencia fué desarrollado por Randall y Wilkins[11], basándose en que los electrones en estados energéticos metaestables, al excitarse térmicamente, pasan a la banda de conducción, de donde regresan a su estado base con la emisión termoluminiscente correspondiente.

Los parámetros que intervienen en el desarrollo, son:

E = Profundidad de la trampa (energía de amarre de un electrón sustitucional).
p = Probabilidad de escape para un electrón.
T = Temperatura de calentamiento.
k = Constante de Boltzman.
s = Constante
I = Intensidad luminiscente.
β = Velocidad de calentamiento.
n = Número de electrones en las trampas en el tiempo t.

El desarrollo parte del hecho de que los electrones tienen una distribución Maxwelliana de energías térmicas, de donde, la probabilidad de escape para un electrón es:

$$p = s \exp(-E/kT) \qquad .....(1)$$

Cabe mencionar, que se considera que la trampa es una caja de potencial de paredes rígidas y que s es el producto de la frecuencia de choque por el coeficiente de reflexión para un electrón que se encuentre en dicha caja.

La variación en el tiempo del número de electrones n, en las trampas, es:

$$\frac{dn}{dt} = - np \qquad .....(2)$$

Sustituyendo (1) en (2), tenemos:

$$\frac{dn}{dt} = - ns \exp(-E/kT) \qquad .....(3)$$

Resolviendo (3), se llega al valor de n:

$$n = n_o \, e^{-\int_{T_o}^{T} s/\beta \; e^{-E/kT} \, dT} \qquad .....(4)$$

Ahora bien, experimentalmente se ha observado, que la intensidad luminosa, es directamente proporcional a la velocidad de introducción de electrones en las trampas, esto es:

$$I = - C \frac{dn}{dt} \qquad .....(5)$$

o bien, si sustituimos (3) en (5), tenemos:

$$I = - C \, ns \, e^{-E/kT} \qquad .....(6)$$

si tomamos C = 1 y sustituimos (4) en (6), tendremos finalmente:

$$I = n_o \, e^{-\int_{T_o}^{T} s/\beta \; e^{-E/kT} \, dT} \cdot s \, e^{-E/kT} \qquad .....(7)$$

que es la relación entre la intensidad de luminiscencia y las trampas de profundidad E.

Esta última relación, se puede expresar aproximadamente, en la forma siguiente:

$$I \simeq n_o \, sA \, e^{[-u - \alpha(1/u - 2/u^2)(e^{-u}/u)]} \qquad .....(8)$$

en donde:

$$A = \exp\left\{\alpha\left[\frac{e^{-u_o}}{u_o} - E_1(u_o)\right]\right\} \quad ; \quad u = E/kT \qquad .....(8a)$$

(Ver apéndice I). $\alpha = sE/\beta k$

El otro modelo al cual nos referimos anteriormente, fué propuesto por Cameron y Zimmerman[8] y se basaron en su modelo físico que propone la creación de trampas adicionales durante la exposición y la suposición de una densidad máxima de trampas. Los parámetros usados son: D = Cantidad de exposición a la radiación.

N = Número de trampas a cualquier exposición.

N_0= Número de trampas antes de la irradiación.

L = Número de trampas llenas a cualquier exposición.

N_f= Máximo número posible de trampas.

α = Probabilidad de creación de trampas.

β = Probabilidad de llenado de trampas.

La variación del número de trampas N, con respecto a la radiación, es igual al producto siguiente:

$$\frac{dN}{dR} = \alpha(N_f - N) \qquad .....(9)$$

de donde se obtiene el valor de N, que resulta ser:

$$N = N_0 e^{-\alpha R} + N_f (1 - e^{-\alpha R}) \qquad .....(10)$$

conocido N, podemos plantear la ecuación diferencial de L, para encontrar posteriormente, su valor.

La variación de L con respecto a R es la siguiente:

$$\frac{dL}{dR} = \beta(N - L) \qquad .....(11)$$

La solución de esta ecuación (Ver apéndice II) es:

$$L = \frac{\beta N_0}{\alpha - \beta}(e^{-\beta R} - e^{-\alpha R}) + \frac{N_f}{\alpha - \beta}\left[\alpha(1 - e^{-\beta R}) - \beta(1 - e^{-\alpha R})\right] \qquad (12)$$

El número de trampas llenas por cm^3, se puede graficar contra la exposición en roentgens para algunos dosímetros como el de LiF y el CaF_2, cuyos parámetros ya han sido publicados. La gráfica característica del LiF, está representada en la figura IV.

Esta gráfica, es totalmente análoga a la obtenida para el bo

rato de litio, solo que la dósis recibida en roentgens, no es calculada, y en su lugar aparece el tiempo a que fué sometida la muestra a la exposición. Una situación parecida a la anterior se tiene con respecto a las trampas producidas, pués a la fecha, no están publicados los parámetros característicos de este material; sin embargo, en lugar de ésto, graficaremos la intensidad luminosa medida en nanocoulombs.

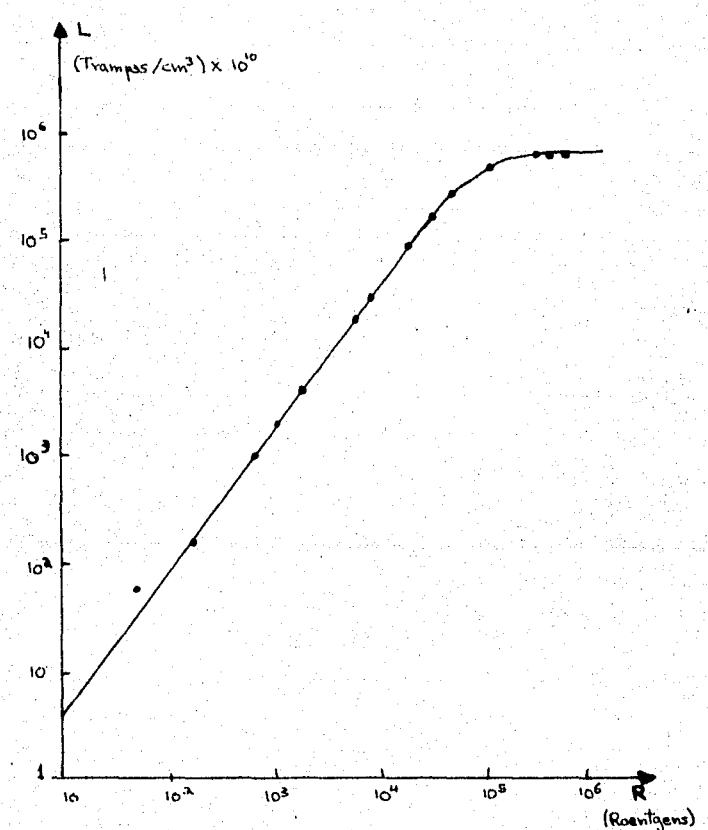

L
(Trampas/cm³) x 10¹⁰
10⁶
10⁵
10⁴
10³
10²
10
1
10
10²
10³
10⁴
10⁵
10⁶
R
(Roentgens)

FIGURA IV.

CAPITULO II

INSTRUMENTACION ASOCIADA

La información experimental obtenida en este trabajo, fué conseguida mediante el equipo termoluminiscente de la Harshaw Chemical Co. modelo 2000.

En principio, para poder usar el fenómeno de la termoluminiscencia en dosimetría de radiación ionizante, se debe calentar el fósforo irradiado, y poder medir en algún sistema de detección sensible, la luminiscencia producida[15]. Consecuentemente, la instrumentación básica para todo equipo termoluminiscente, es la siguiente:

I.- Unidad de calentamiento y control de temperatura.

II.- Mecanismo para colocar el fósforo en el circuito de calentamiento, dentro de una cámara obscura.

III.- Detector luminiscente con filtros ópticos.

IV.- Fuentes de Poder.

V.- Sistemas de lectura.

El equipo usado en el laboratorio, está compuesto de dos unidades: el módulo 2000A que consiste en la instrumentación I-IV, y el módulo 2000B que es propiamente el sistema de lectura.

La figura V, muestra un diagrama a bloques de un circuito termoluminiscente.

La unidad de calentamiento, consiste en una fuente de poder, un transformador con control para calentamiento, la plancheta en donde se colocará el dosímetro por calentarse, y un termopar (acoplado a la plancheta) de voltaje retroalimentado que es comparado con la salida del generador.

Esta unidad (I), debe producir las temperaturas indicadas en la escala, tan rápido como sea posible, así mismo, deberá trabajar con una razón de calentamiento constante; todo esto es necesario para poder obtener buenas lecturas en dósis bajas y tiempos cortos de medición.

Para la experimentación, se eligió un tiempo de calentamiento de 60 segundos, tiempo más que suficiente para que (con la razón de calentamiento del equipo) el fósforo pudiera calentarse hasta una temperatura de 250°C.

La parte II, correspondiente al mecanismo anteriormente mencionado, debe ser tal que se puedan fácilmente cambiar los dosímetros por leer y colocarlos dentro de la cámara obscura sin dañar la conexión que acopla la plancheta al circuito de calentamiento.

Usualmente es utilizado un tubo fotomultiplicador como detector luminiscente; la fuente de alto voltaje debe ser muy bien regulada para obtener una diferencia de potencial estable tanto en los dinodos como en el ánodo. Para reducir el ruido del tubo fotomultiplicador, se

enfrían los alrededores del tubo por medio de un ventilador que tam - bién permitirá el rápido enfriamento de la plancheta al término de una lectura. A este detector se le acoplan filtros ópticos, empleados para discriminar la radiación infrarroja. La unidad de detección incluye también un amplificador de corriente directa.

La última parte componente del equipo, es la unidad de lectu ta digital y sistema para graficar. Para las medidas de laboratorio, es más usado un graficador X-Y, pués de esta manera, se podrá obtener directamente el espectro termoluminiscente.

Para dosimetría rutinaria, se suele usar la lectura dígita, obtenida mediante la integración de la corriente a la salida del amplificador.

La necesidad básica que debe satisfacer un analizador termoluminiscente, es que pueda medir la luz emitida en un amplio rango de exposiciones y preferiblemente de una forma lineal.

El equipo utilizado, uno de los más modernos existentes en el comercio, emite una luz estandar que puede ser detectada en el tubo fotomultiplicador cuando la plancheta se encuentra en la posición de intercambio de dosímetros. Esta luz para condiciones constantes del equipo, nos debe dar un rango de lecturas, especificado por el fabri - cante, dentro del cual el aparato estará calibrado.

La tabla I, nos muestra una serie de valores obtenidos en las condiciones arriba indicadas y de los cuales encontramos que la variación estandar tiene un valor de σ= 0.189 ncb.

TABLA I.-

Los valores siguientes tienen como unidades, nanocoulombs.

x_i	$\bar{X} - x_i$	x_i	$\bar{X} - x_i$
6.611	0.157	6.566	0.202
6.780	0.012	6.829	0.061
6.971	0.203	6.952	0.184
7.010	0.242	6.904	0.136
6.624	0.144	6.590	0.178
6.580	0.188	6.884	0.116
6.502	0.266	6.803	0.035
6.540	0.228	6.604	0.164
6.599	0.169	6.638	0.130
6.535	0.233	6.535	0.215
6.884	0.116	6.607	0.161
6.765	0.003	6.638	0.130
6.941	0.173	6.937	0.169
6.617	0.151	6.494	0.274
6.507	0.261	6.565	0.203
6.885	0.117	6.938	0.170
7.187	0.419	7.044	0.276
6.761	0.007	6.721	0.047
6.865	0.097	7.245	0.477
7.077	0.309	7.097	0.329
6.686	0.082	6.755	0.013
6.850	0.082	6.899	0.131
6.959	0.191	6.656	0.112
6.702	0.066	7.015	0.247
7.167	0.399	6.569	0.199
6.902	0.134	7.110	0.342
6.949	0.181	7.016	0.248
7.017	0.249	6.939	0.171
6.855	0.087	6.892	0.124
6.852	0.084	6.919	0.151
6.881	0.113	6.790	0.022
6.641	0.127	6.773	0.005
6.693	0.075	6.507	0.261
6.996	0.228	6.485	0.283
6.471	0.297	6.790	0.022
6.742	0.026	6.900	0.132
6.791	0.023	6.717	0.051
6.717	0.051	6.855	0.087
6.766	0.002	6.705	0.063
6.707	0.061	6.884	0.116
6.439	0.329	6.786	0.018
6.608	0.160	6.652	0.116
6.751	0.017	6.617	0.151
6.485	0.283	6.565	0.203
6.706	0.062	6.240	0.528
6.790	0.022	6.709	0.059
6.825	0.057	6.692	0.076
6.635	0.133	6.725	0.043
6.592	0.176	6.663	0.105
7.144	0.376	6.851	0.083

$\bar{X} = 6.768$ nab ; $\sigma = 0.189$ nab ; $x = 6.768 \pm 0.189$ nab .

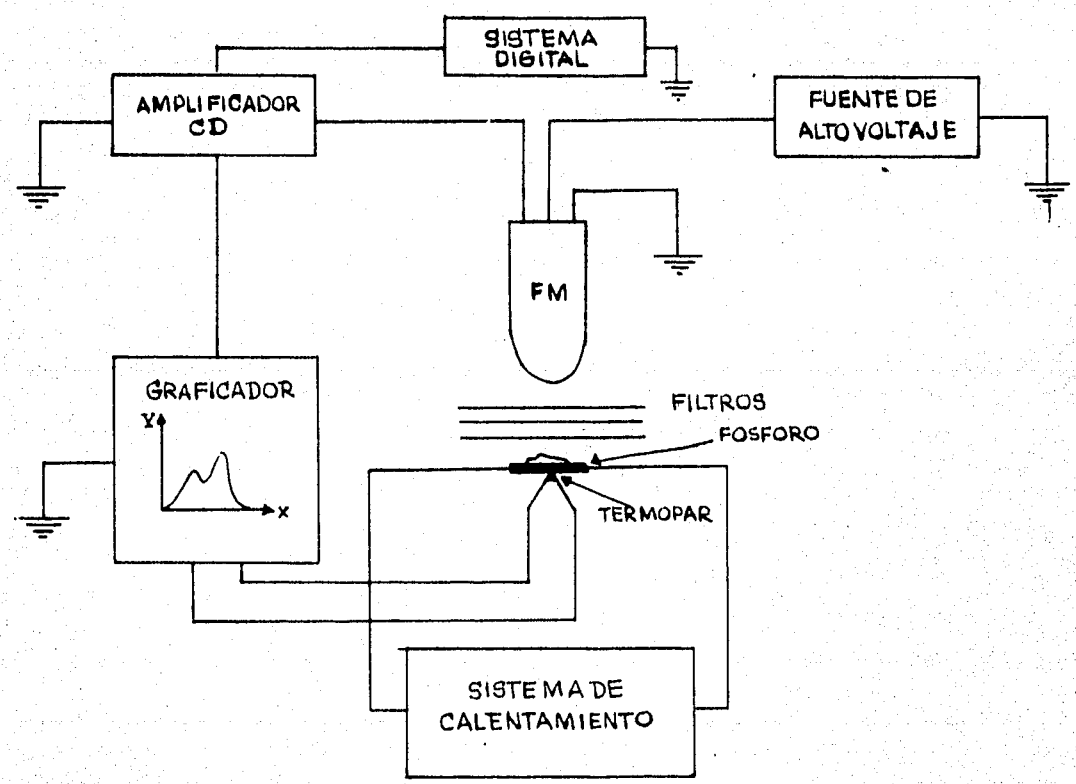


FIGURA V.- Diagrama a bloques de un circuito TL.

CAPITULO III

EXPERIMENTOS REALIZADOS. CONCLUSIONES Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

El análisis de la literatura sobre el borato de litio activado con manganeso, deja al lector incertidumbre sobre la adecuada utilización de los materiales termoluminiscentes que han sido preparados en formas diferentes.

Sobre esta situación ya se ha hecho mención en la parte introductoria de este trabajo, en el que hemos sistematizado el método de preparación de los lotes diversos del $Li_2B_4O_7$:Mn, al que corresponden diferentes espectros termoluminiscentes.

La parte general de preparación de todos los lotes estudiados, consiste en hacer combinar 14.55 gr de ácido bórico con 4.34 gr de carbonato de litio en la menor cantidad de agua posible, solución a la que se añade el cloruro de manganeso con cuatro moléculas de agua en la proporción que se indica específicamente en cada método de preparación.

Cuando el desprendimiento de bióxido de carbono ha concluído, se deseca el material resultante en una estufa a aproximadamente

90°C por 4-6 horas. El material en esta forma queda listo para proce - sarse según los diferentes métodos de preparación que se indican más adelante.

El porcentaje del activador indicado en cada método de preparación, corresponde al manganeso expresado como $MnCl_2.4H_2O$; así mismo en los casos en que se tableteó, las presiones aplicadas corresponden a las fuerzas indicadas en cada método de preparación (Toneladas fuerza), por el área de las tabletas ($\sim$ 2.5 cm de diámetro).

MPI .- El material colocado en un crisol de alúmina recristalizada, se introduce en una mufla a 960°C por 30 minutos, después de lo cual se vierte, aún fundido, sobre una placa de acero fría. En esta forma el material se obtiene como un sólido , translúcido de color ligeramente ámbar; la proporción de manganeso en este lote, es de 0.34% .

MPII.- El material con 0.34% de Mn, se coloca en un crisol de porcelana que se lleva a una mufla a 960°C por media hora, lo que constituye el método de preparación MPIIa; mientras que si este material después de su calentamiento en la mufla, es recalentado por 30 minutos a 800°C y posteriormente pulverizado, el método de preparación será MPIIb.

MPIII.- El material con una proporción de manganeso de 0.34%, se funde en un crisol de alúmina recristalizada a 960°C por 30 minu -- tos; el producto fundido se vierte sobre una placa fría de acero inoxidable, calentándose posteriormente a las temperaturas de: 450°C ---

(MPIIIc), 660°C (MPIIIb), 750°C (MPIIIa) y 800°C (MPIIId), después de lo cual el material es pulverizado.

MPIV .- El material (0.34% de Mn) colocado en un crisol de porcelana se funde en una mufla a 960°C durante 30 minutos, el sólido resultante, se pulveriza y se pasa por una malla de latón del número 40 (separación de hilos; 350 micras), después de lo cual es pastillado y sinterizado a una temperatura de 746°C por media hora; el dosímetro termoluminiscente lo constituye la propia pastilla.

MPV .- El material es fundido en un crisol de porcelana a 960°C por un tiempo de 30 minutos; el sólido resultante enfriado se pulveriza, se tabletea bajo una presión de 4 ton/tableta (= 4 ton/tab), y se sinteriza a una temperatura de 660°C durante un tiempo de 30 minutos, después de lo cual el material se pulveriza y se pasa por la malla antes mencionada. Con este método de preparación se obtuvieron dos lotes; MPVa) sin activador, y MPVb) con una proporción de 50% de manganeso.

MPVI .- El material se funde en un crisol de porcelana a 960°C por media hora; el sólido ya fundido y enfriado, se pulveriza y se tableta a una presión de 4 ton/tab. El material es sinterizado a 746°C, después de lo cual es nuevamente pulverizado y pasado por la malla utilizada. Con este método de preparación, se obtuvieron los siguientes lotes;

MPVIa) Con manganeso al 0.00% .

MPVIb) Con manganeso al 0.10% .

MPVIc) Con manganeso al 0.20% .

MPVId) Con manganeso al 0.30% .

MPVIe) Con manganeso al 0.50% .

MPVII .- El material usado en este método de preparación lleva un 0.50% de manganeso como activador, y es fundido en un crisol de porcelana a 960°C por 30 minutos; el sólido resultante enfriado se pulveriza, se tabletea, se sinteriza a 746°C por 30 minutos, después de lo cual el material es nuevamente pulverizado y pasado por la malla antes mencionada; las presiones usadas al tabletear fueron las siguientes: MPVIIa) 5 ton/tab y MPVIIb) 8 ton/tab.

MPVIII .- En este método de preparación se obtuvieron tres lotes diferentes, que contienen al borato con un 0.34% de manganeso procesado en un crisol de porcelana que se calentó a 960°C durante media hora; el sólido obtenido se pulverizó y al hacerlo pasar por la malla, constituyó el lote MPVIIIc. Para los lotes restantes este último material, fué tableteado a una presión de 4 ton/tab y sinterizado a una temperatura de: MPVIIIa) 700°C , MPVIIIb) 746°C, durante 30 minutos después de lo cual el material resultante se pulverizó y se pasó nuevamente por la malla.

MPIX.- En los lotes diferentes que se obtuvieron en este método de preparación, el borato de litio es activado con un 0.34% de manganeso, material que es calentado a la temperatura de 960°C durante 30 minutos en un crisol de platino; el fundido obtenido una vez enfriado constituirá el lote MPIXb después de haberse pulverizado y pasado

por el tamíz. Para los lotes restantes el proceso seguido fué el si - guiente:

MPIXa) El material fundido en forma de polvo se tabletea a una presión de 4 ton/tab, después de lo cual se sinteriza a una temperatura de 746°C por media hora; finalmente se hace polvo y se pasa por la malla.

MPIXc) El sólido fundido enfriado se pasa a un crisol de porcelana y se le aplica nuevamente una temperatura de 960°C durante 30 minutos, el fundido se vierte sobre una placa fría de acero inoxidable formándose un nuevo sólido amorfo, el cual es pulverizado y tamizado.

MPX .- En un crisol de porcelana se calienta el borato activado con manganeso al 0.34%, a una temperatura de 960°C por un tiempo de 30 minutos, después de lo cual se pasa a un crisol de platino, calentándose a la misma temperatura durante 20 minutos; del fundido resultante enfriado, se formaron dos lotes:

MPXb) El material así obtenido se pulveriza y se pasa por la malla utilizada.

MPXa) El material es pulverizado y tableteado a una presión de 4 ton/tab y sinterizado a 746°C; posteriormente se vuelve a pulverizar y pasar por la malla.

A continuación se describirán los experimentos realizados, en los cuales, salvo que se indique lo contrario, las medidas fueron obtenidas utilizando 9.0 ± 0.7 mg del material termoluminiscente.

En la figura 1, se muestra la variación de la altura del pico de 90°C, contra el tiempo transcurrido después de la irradiación para el material obtenido según el método de preparación MPI, que solamente produce un sólo pico cuando ha sido activado con rayos X de cuarenta kilovolts.

Cuando el material obtenido mediante el método de preparación MPI, es irradiado con rayos gamma, el espectro termoluminiscente muestra un nuevo pico de 240°C, que corresponde a la desexcitación de trampas de electrones diferentes a las que dan lugar al pico de 90°C.- Esta situación se ilustra en la figura 2, en la que se observan los espectros termoluminiscentes para este material, cuando la fuente de radiación es de: rayos X (curva 1) y radiación gamma (curva 2).

La figura 3, muestra el decaimiento en el tiempo para una muestra de polvo, preparada con el método MPI, e irradiada con rayos gamma.

La posición sistemática del pico de 90°C, para el lote preparado de la misma manera (MPI), para muestras (no polvo) de diferente tamaño y forma, e irradiadas con rayos X, se ilustra en la figura 4.

La figura 5 corresponde al $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) procesado según el método de preparación MPI, cuando es expuesto a radiación gamma de Co-60, para:

Curva 1) Dosímetro bajo la forma de polvo.

Curva 2) Dosímetro en la forma de sólido amorfo.

Variaciones aparentemente no substanciales en el método de preparación de las muestras, producen un cambio definitivo en el correspondiente espectro termoluminiscente. Esta situación se ilustra en

la figura 6, perteneciente a muestras de borato procesado con el método de preparación MPIIb e irradiadas con rayos X de 40 KV, en donde el pico de 90°C está definido, pero se ha perdido resolusión para los picos que aparecen a temperaturas más altas. En esta misma gráfica, la curva 1 corresponde al espectro obtenido inmediatamente después de la irradiación, y la curva 2 al espectro registrado 24 horas después.

La comparación del espectro termoluminiscente para borato de litio sin activador, obtenido según el método de preparación MPIIa e irradiado con rayos X de 40 KV, se observa en la figura 7, en donde la curva 1 corresponde al material arriba indicado bajo forma de sólido amorfo, y las curvas 2 y 3 para el mismo material bajo la forma de polvo. De esta figura podemos concluir que el material termoluminiscente sin activador, es inadecuado como dosímetro de radiación.

Para una proporción de manganeso de 0.34% como activador del borato de litio preparado con las especificaciones del método de preparación MPIIa, el espectro termoluminiscente nos muestra al pico de 90°C en forma definida, y la variación de la intensidad termoluminiscente contra tiempo trancurrido se muestra en la figura 8. Las curvas números 1 al 5, fueron obtenidas utilizando proporciones alícuotas del lote de borato arriba indicado.

La diferencia en el espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%), obtenido según el método de preparación MPIIa, se observa en la figura 9, donde la curva 1 corresponde a la muestra excitada con radiación gamma y la curva 2 con rayos X de 40 KV.

Si la temperatura de calentamiento del material, tal como se señala en el método de preparación MPIIIb, es de 660°C, se obtiene la curva termoluminiscente (2) de la figura 10 y si es de 750°C la curva (1), en el caso de que la exposición sea para rayos X de 40 KV. De esta gráfica podemos igualmente inferir que los métodos de preparación MPIIIa y MPIIIb nos producen espectros termoluminiscentes de poca definición que no son adecuados para dosimetría.

El material termoluminiscente para su uso en dosimetría, se presenta en la forma de polvo o de pequeñas pastillas que constituyen propiamente el dosímetro. Por esta razón, en este trabajo se procesó también el material termoluminiscente bajo esta última forma.

La reproducibilidad de resultados respecto al espectro termoluminiscente para pastillas de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%), procesado según el método MPIV, irradiado con rayos X de 40 KV se comprueba en la figura 11, donde las curvas 1, 2 y 3, muestran la misma forma de espectro aunque la altura de los picos varía debido a que corresponden a pastillas de diferente peso y a que fueron tomadas en diferentes tiempos después de la exposición.

En la figura 12, se observa el espectro termoluminiscente para pastillas de borato de litio sin activador, preparado según el método MPIV e irradiado con rayos X de 40 KV. Las curvas corresponden a: 1) pastilla precalentada a una temperatura de 750°C y 2) a una temperatura de 580°C. En ausencia del activador los picos de alta temperatura no aparecen.

En las figuras 13 y 14, se muestran los espectros termoluminiscentes para polvo de borato de litio sin activador para las temperaturas de sinterización; 660°C (MPVa) y 746°C (MPVIa); en ambos casos la fuente de radiación fue un generador de rayos X de 40KV. En las gráficas 13a y 14a, se determinan las componentes de las curvas de decaimiento.

El decaimiento para muestras de polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn en las proporciones de 0.10%(MPVIb), 0.30% (MPVId) y 0.50% (MPVIe) irradiadas con rayos X de 40 KV, contra tiempo transcurrido, se observa en las figuras 15, 16 y 17, y las componentes de las curvas de decaimiento respectivas en las figuras 15a, 16a y 17a.

Los valores de vidas medias para el polvo de borato de litio sin activador, pero procesados a diferentes temperaturas de sinterización son del mismo orden de magnitud, siendo menor el correspondiente a la de 660°C (ver figura 13a y figura 14a).

Para las muestras de borato de litio sinterizadas a la misma temperatura, pero con diferentes proporciones de manganeso: 0.10%, - 0.30% y 0.50%, los valores determinados de vidas medias se ilustra en las figuras 15a, 16a y 17a, y son mayores que las muestras de borato de litio sin activador.

La figura 18, compara la forma del espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn preparado de acuerdo las especificaciones de MPIV, cuando la irradiación es para rayos X de 40 KV para la siguientes proporciones de manganeso: 0.20% (curva 1), 0.30% (curva 2), -

0.10% (curva 3), y 0.50% (curva 4). Del análisis de esta figura, resulta aparente que la proporción de manganeso óptima, está comprendida entre 0.20% y 0.30%.

El efecto de diferentes valores de la presión; 5 ton/tab - (MPVIIa) y 8 ton/tab (MPVIIb), en el proceso de sinterización, respecto del espectro termoluminiscente para radiación X de 40 KV, se observa en las figuras 19 y 20 respectivamente. El decaimiento de los picos correspondientes a dichas muestras, se ilustran en las figuras 19a y 20a.

La situación comparativa para muestras de polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn(0.50%), en lo relativo a la forma del espectro termoluminiscente, se ve en la figura 21, donde la curva(1) corresponde a una presión de 5 ton/tab, la curva(2) a una presión de 4 ton/tab y la curva(3) a una presión de 8 ton/tab. La posición de los picos es independiente de la presión asociada al proceso de sinterización.

La variación del espectro termoluminiscente para muestras de polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) para las temperaturas de sinterización de 700°C (MPVIIIa) y de 746°C (MPVIIIb), se observan en las figuras 22 y 23 respectivamente. En ambos casos, la fuente de radiación es un generador de rayos X de 40 KV.

El equipo para medición de termoluminiscencia utilizado, permite obtener espectros parciales de los picos deseados mediante el - ajuste adecuado del control de temperatura. Esta situación se ilustra en la figura 24, en el que el control de temperatura se ajustó a una

máxima de 110°C, que permitió registrar solamente el pico de 90°C, cortando del espectro total los picos de más altas temperaturas.

La respuesta espectral de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) procesado con el método de preparación MPVIIIb para rayos X de energías: 20 KV, 26 KV, 32 KV y 38 KV, se ilustra en la figura 25; y para las energías de rayos X correspondientes a 60 KV, 80 KV, 100 KV, 120 KV, 180 KV y 220 KV se observan en la figura 26. En estas últimas dos figuras, se observan espectros termoluminiscentes semejantes para las energías de rayos X entre 20 KV-30 KV; y entre 60 KV-200 KV.

Con el ajuste del equipo termoluminiscente para la obtención de picos parciales del espectro integral que se ha mencionado con anterioridad (ver experimento que se ilustra en la figura 24), se obtuvo la respuesta de la intensidad termoluminiscente para el pico de baja temperatura (90°C) contra tiempo de exposición a rayos gamma del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%), de acuerdo con el método de preparación MPVIIIb. La curva 1 de la figura 27, se obtuvo inmediatamente después de la irradiación y la curva 2, 24 horas después.

La situación equivalente a la descrita en el párrafo anterior, para los picos de alta temperatura, se observa en la figura 28, donde la curva 1 corresponde a una lectura tomada inmediatamente después de la irradiación, y las curvas 2 y 3, para 24 horas y 140 horas respectivamente; en este caso las muestras fueron expuestas a radiación gamma.

La figura 29 nos muestra los picos de 90°C y 140°C para el

mismo material y para el mismo tipo de radiación con que se obtuvo la figura 28. Este espectro fue obtenido mediante el ajuste del instrumento usado para graficar picos parciales.

La figura 30, nos da la respuesta de la intensidad termoluminiscente contra tiempo de exposición para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) MPVIIIb, irradiado con rayos X de 40 KV. La curva 1) corresponde a la termoluminiscencia total (picos de 90°C, 140°C y 240°C) y la curva 2) exclusivamente para los picos de alta temperatura (140°C y 240°C), situación que se logra calentando el material a 100°C.

La figura 31, nos muestra la variación de la intensidad termoluminiscente para diferentes tiempos de exposición del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) procesado con MPVIIIb, e irradiado con rayos X de 40 KV. Las curvas 1, 2, 3 y 4 de dicha figura fueron obtenidas 3 hr, 26 hr, 54 hr, 123 hr y 170 hr después de la irradiación y la figura 32 muestra el decaimiento en el tiempo del espectro del material correspondiente.

Si el material termoluminiscente irradiado es precalentado a 100°C, las trampas de electrones correspondientes al pico de 90°C, se desexcitan, permaneciendo los picos de alta temperatura más estables, esta situación se ilustra en la figura 33, que nos da la respuesta de la intensidad termoluminiscente para diferentes tiempos de exposición del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%), preparado con el método MPVIIIb e irradiado con rayos X de 40 KV. Las curvas 1, 2, 3, 4 y 5, fueron obtenidas 5 hr, 25 hr, 124 hr, 171 hr y 290 hr después de la irradiación, y

el decaimiento del pico de 140°C en el tiempo, para una de las muestras citadas en la figura arriba mencionada, se ilustra en la figura 34.

Si se usa un generador de rayos X a 220 KV, 15 mA, la respuesta de la intensidad termoluminiscente del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) procesado según se especifica en MPVIIIb para diferentes tiempos de exposición se ilustra en la figura 35, (curva 1) 8 horas y (curva 2) 25 horas después de la irradiación. El espectro termoluminiscente correspondiente al experimento anterior se observa en la figura 36.

La figura 37 ilustra los espectros termoluminiscentes para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) irradiado con rayos X de 40 KV. La curva 1 corresponde al material indicado, procesado en un crisol de platino (sin sinterizar), siguiendo las indicaciones especificadas en MPIXb, y la curva 2, para el material fundido en un crisol de porcelana (sinterizado) según los pasos mencionados en MPVIIIb.

Se compara en la figura 38, los espectros termoluminiscentes para $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%), irradiado con Co-60; curva 1, material fundido en crisol de platino (MPIXb); curva 2, material fundido en crisol de porcelana (MPVIIIc) y curva 3, material previamente procesado en crisol de platino y refundido posteriormente en crisol de porcelana (- MPIXc).

La respuesta termoluminiscente del pico de 90°C (espectro parcial) contra tiempo transcurrido del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) para los métodos de preparación; MPVIIIb (crisol de porcelana, sinteriza

do) y MPIXb (crisol de platino, no sinterizado), se aprecia en las figuras 39 y 40 respectivamente.

Las figuras 41, 42 y 43, muestran los espectros termoluminiscentes para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) irradiado con rayos X (40 KV) y con Co-60 (unidad gammacell -3500 Ci- y unidad gammatrón -850 Ci-) para los métodos de preparación que se indican en las figuras respectivas.

En la figura 44, está graficada la respuesta termoluminiscente del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%), MPIXb, contra tiempo de exposición. La curva 1, fué obtenida inmediatamente y la curva 2, 119 horas después de la irradiación. Se obtuvieron curvas semejantes para períodos diarios intermedios, situados entre las curvas 1 y 2, que permiten hacer correcciones debidas a diferentes tiempos de lectura después de la irradiación.

Selección del método óptimo de preparación de $Li_2B_4O_7$:Mn .-

De todos los métodos de preparación estudiados, cuyo detalle y respuesta a la radiación se han mencionado en este trabajo, señalamos tres métodos; MPVIIIb, MPVIIIc y MPIXb, como los que deben ser considerados ya que señalan por una parte, la importancia del método de preparación de un material termoluminiscente y por otra sus respectivas características espectrales.

Cuando el material termoluminiscente con activador de manganeso en la proporción de 0.34%, se prepara siguiendo el método MPIXb, que de acuerdo con el análisis que hemos realizado en este trabajo, es

el óptimo, es irradiado con rayos X de 40 KV, el pico de baja temperatura (90°C), desaparece totalmente en aproximadamente 30 horas, mientras que el pico de 200°C, útil para dosimetría termoluminiscente, permanece estable.

La situación descrita en el párrafo anterior, es ilustrada en la figura 45, en la que se observa el decaimiento del material termoluminiscente al que se hace referencia después de: 20 minutos, 50 minutos, 135 minutos y 29.83 horas.

El decaimiento de las curvas termoluminiscentes para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) MPVIIIb, se ilustra en la figura 46, en la que se observa la presencia de los picos de 90°C de baja temperatura y el de 180°C, perfectamente bien definidos, teniendo el inconveniente, este material, de la desaparición del pico de 90°C en forma más lenta que para el material cuyo espectro termoluminiscente se hace referencia en la figura 45.

En la figura 47, se ve el espectro termoluminiscente para el mismo material mencionado en las figuras 45 y 46, pero obtenido según MPVIIIc. En esta gráfica se ve la presencia del pico de 100°C así como el de 200°C, pero debido a la poca resolución espectral de este material, este método de preparación dista de ser el óptimo.

La comprobación del estado físico final de las muestras obtenidas siguiendo el método de preparación; MPIXb y MPVIIIb, fué hecha por análisis cristalográfico con rayos X cuyos espectros se ven en las figuras 45 y 46 que ponen de manifiesto la misma evidencia cristalográfica (ver apéndice III).

La figura 47 es el espectro termoluminiscente del material obtenido según MPVIIIc, muestra la ausencia de un arreglo cristalino para dicho material.

La evidencia encontrada en los experimentos que se ilustran en la figuras 45 , 46 y 47 resuelven desde el punto de vista de la dosimetría termoluminiscente el problema de la sistematización observacional de un espectro termoluminiscente con relación al método de preparación que se ha seguido para obtenerlo, y al mismo tiempo plantean un interesante problema relacionado directamente a la Física del Estado Sólido.

La figura 48, nos dá la respuesta espectral del $Li_2B_4O_7$:Mn MPIXb para energías de rayos X de: 60 KV, 80 KV, 110 KV, 125 KV, 165 KV, 200 KV y 220 KV.

En la figura 49, se muestra la respuesta termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%) MPIXb, irradiado con rayos X de Co-60, donde la curva fué obtenida tres horas después de la irradiación y las curvas 2 y 3 después de 97 y 121 horas respectivamente.

La figura 50, nos dá la repuesta termoluminiscente para tiempos de lecturas de 20 horas y 56 días después de la irradiación para el material que se señala en la figura 49.

El decaimiento del espectro termoluminiscente típico del material que se mencionó en la figura 49, se observa en la figura 51.

En principio, se encontró que dependiendo del procesamiento del dosímetro, los picos termoluminiscentes característicos de éste, varían de posición.

Como conclusión, podemos decir que de todos los materiales preparados, el más conveniente en todos los aspectos deseados, es el lote de muestras preparadas con el procedimiento MPIXb.

Así pués, el borato de litio activado con manganeso en un 0.34% y preparado en un crisol de platino, presenta la ventaja de que no se requiere sinterización para poder observar en su espectro termoluminiscente un pico de baja temperatura que decae rápidamente, y otro pico que es estable y apropiado para dosimetría.

Para este material, el pico de baja temperatura, corresponde a 90°C, y decae en solamente algunos minutos tanto para cuando se expone a rayos X, como para radiación gamma de Co-60.

En las figuras correspondientes, se puede apreciar que el pico de alta temperatura es muy estable y que aparece en diferente posición dependiendo del tipo de radiación recibida, a saber: en 200°C si se expone a rayos X (energías correspondientes entre 40 KV y 220 KV) y en 180°C si la exposición es a radiación gamma de Co-60.

Una explicación detallada de las propiedades termoluminiscentes de este material, no se encontró en la bibliografía consultada; sin embargo es posible que la razón por la cual no sea necesario sinterizar el lote preparado con MPIXb, es que el platino con que está hecho el crisol en donde se hizo la preparación, sirva como una especie

de catalizador que hace que el borato adquiera una estructura cristalina apropiada para la realización del efecto termoluminiscente.

Para los casos en que la preparación fué hecha en crisoles de porcelana o de alúmina recristalizada, se tuvo que recurrir al proceso de sinterización, en busca de mejores resultados que nos permitieran hacer uso del fenómeno de la termoluminiscencia.

En cuanto a la desaparición rápida del pico de baja temperatura, de igual manera el platino interviene de una manera definitiva, de tal manera, que en el proceso de preparación, existe una gran probabilidad de que se adhieran al material impurezas propias del crisol utilizado, que como se sabe, en ciertas ocaciones a pesar de que en un cristal exista un porcentaje muy pequeño de impurezas, se manifiestan cambios radicales en su constitución y propiedades físicas.

Estas impurezas adicionales ayudan a proporcionar electrones que pueden ser atrapados en niveles de energía de menor magnitud que los correspondientes a los materiales procesados en crisoles diferentes.

BIBLIOTECA CENTRAL
U. N. A. M.

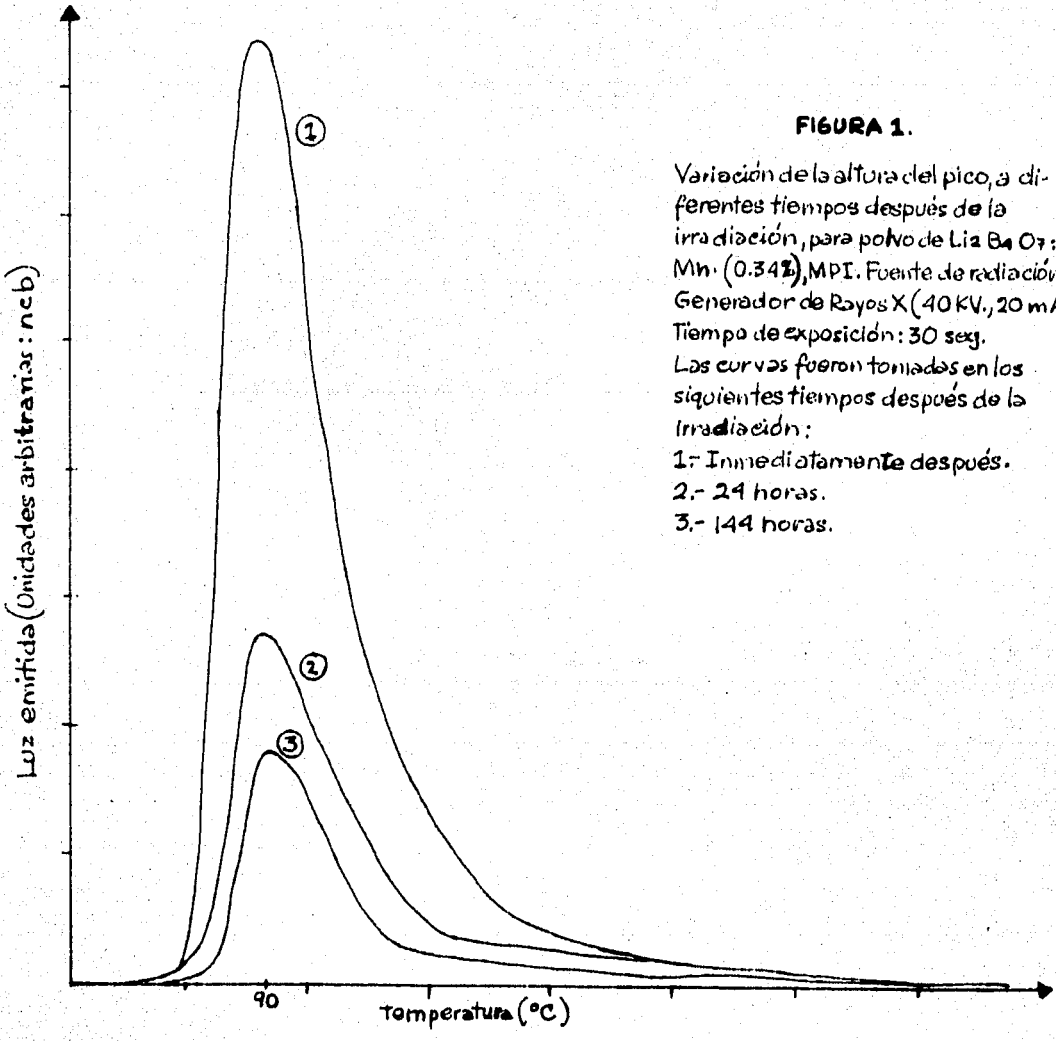


FIGURA 1.

Variación de la altura del pico, a diferentes tiempos después de la irradiación, para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%), MPI. Fuente de radiación: Generador de Rayos X (40 KV., 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.
2.- 24 horas.
3.- 144 horas.

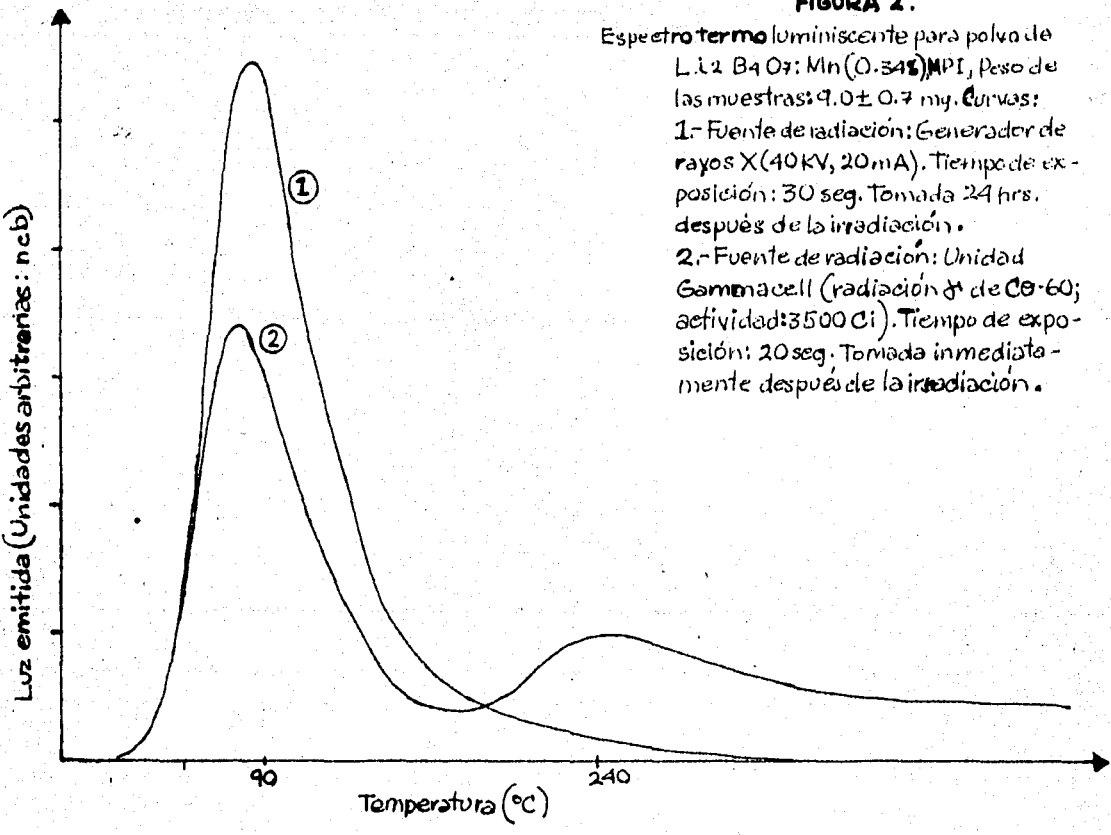


FIGURA 2.

Espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%) MPI, Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Curvas:
1.- Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Tomada 24 hrs. después de la irradiación.
2.- Fuente de radiación: Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci). Tiempo de exposición: 20 seg. Tomada inmediatamente después de la irradiación.

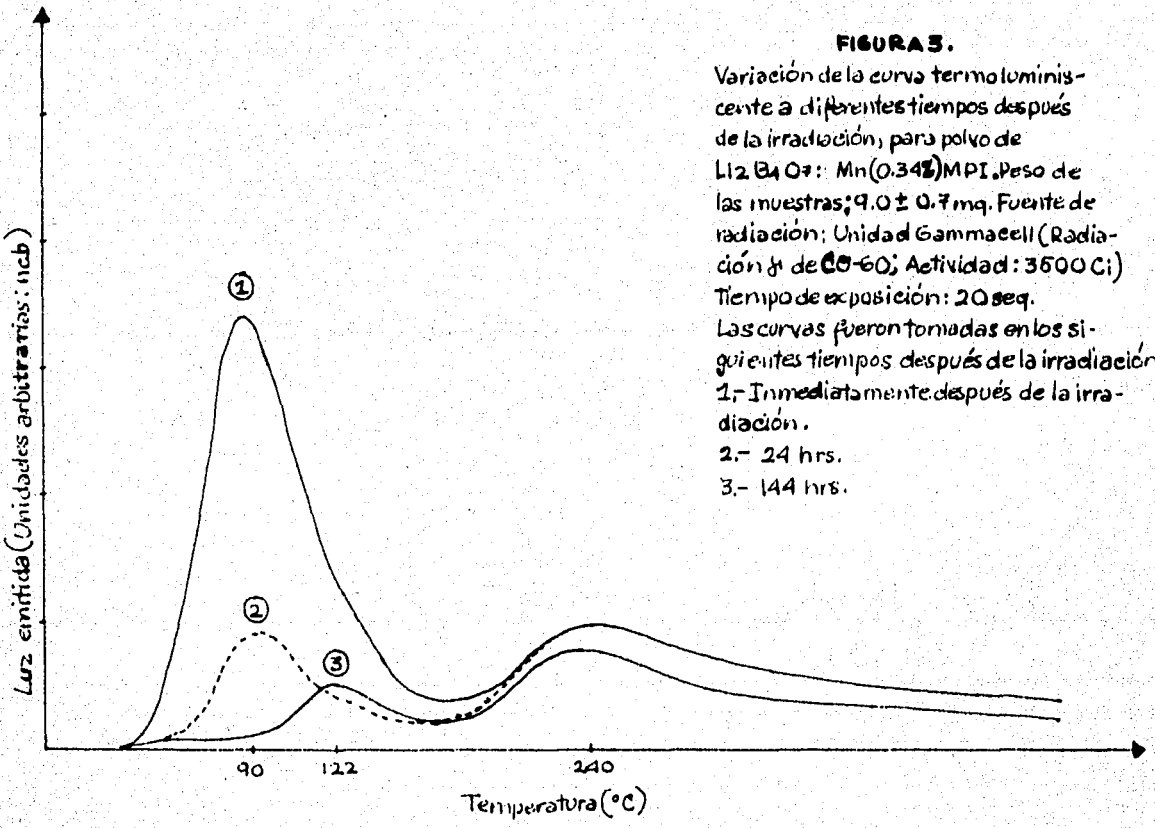


FIGURA 3.

Variación de la curva termoluminiscente a diferentes tiempos después de la irradiación, para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn(0.34%)MPI. Peso de las muestras; 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación; Unidad Gammacell (Radiación γ de Co-60; Actividad: 3600 Ci) Tiempo de exposición: 20 seg.
Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:
1.- Inmediatamente después de la irradiación.
2.- 24 hrs.
3.- 144 hrs.

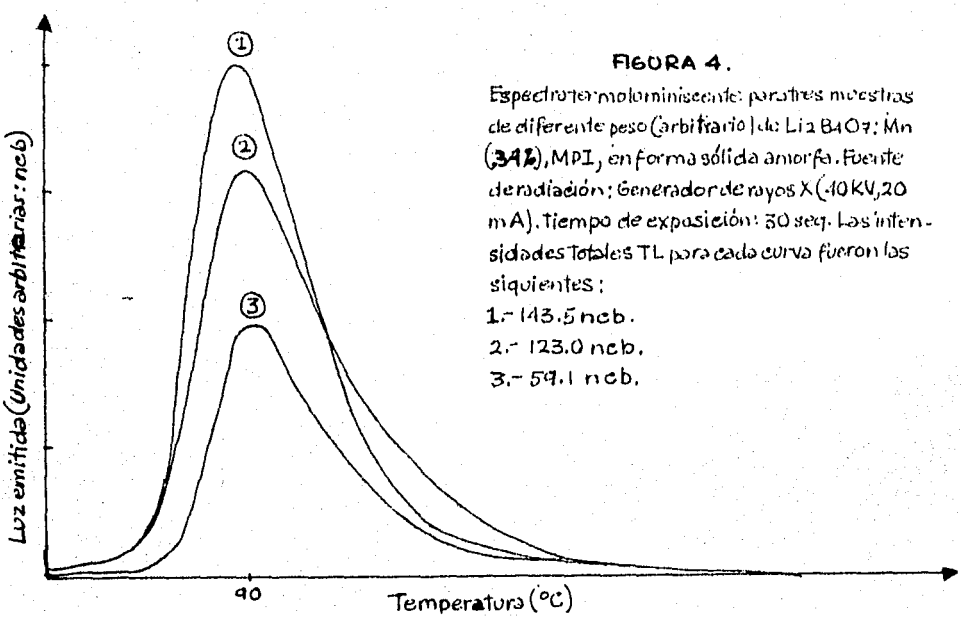


FIGURA 4.

Espectro termoluminiscente: para tres muestras de diferente peso (arbitrario) de $Li_2B_4O_7$: Mn (.34%), MPI, en forma sólida amorfa. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las intensidades Totales TL para cada curva fueron las siguientes:

1.- 143.5 ncb.
2.- 123.0 ncb.
3.- 59.1 ncb.

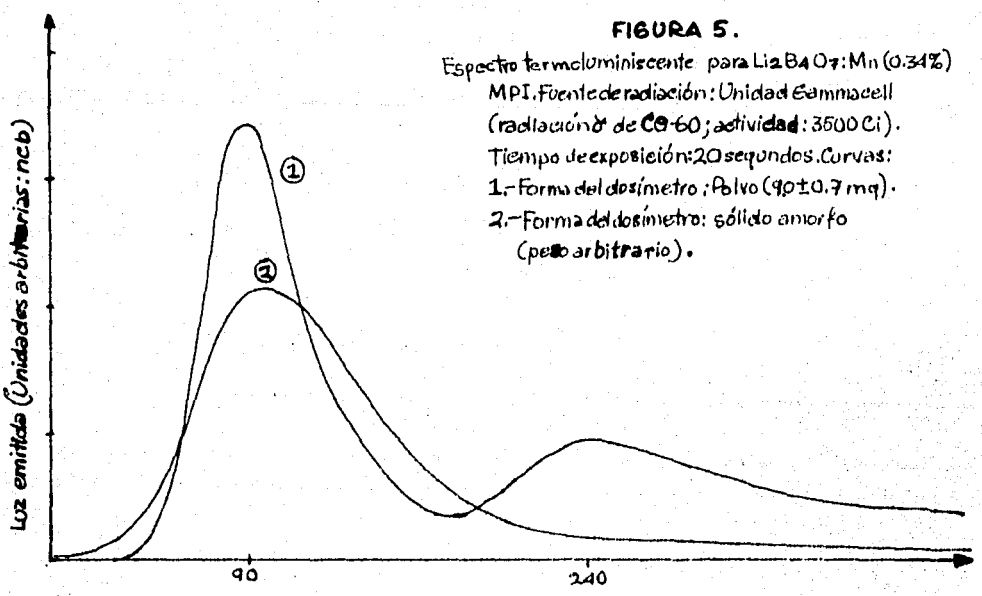


FIGURA 5.

Espectro termoluminiscente para $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%) MPI. Fuente de radiación: Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci). Tiempo de exposición: 20 segundos. Curvas:

1.- Forma del dosímetro: Polvo (90 ± 0.7 mg).
2.- Forma del dosímetro: sólido amorfo (peso arbitrario).

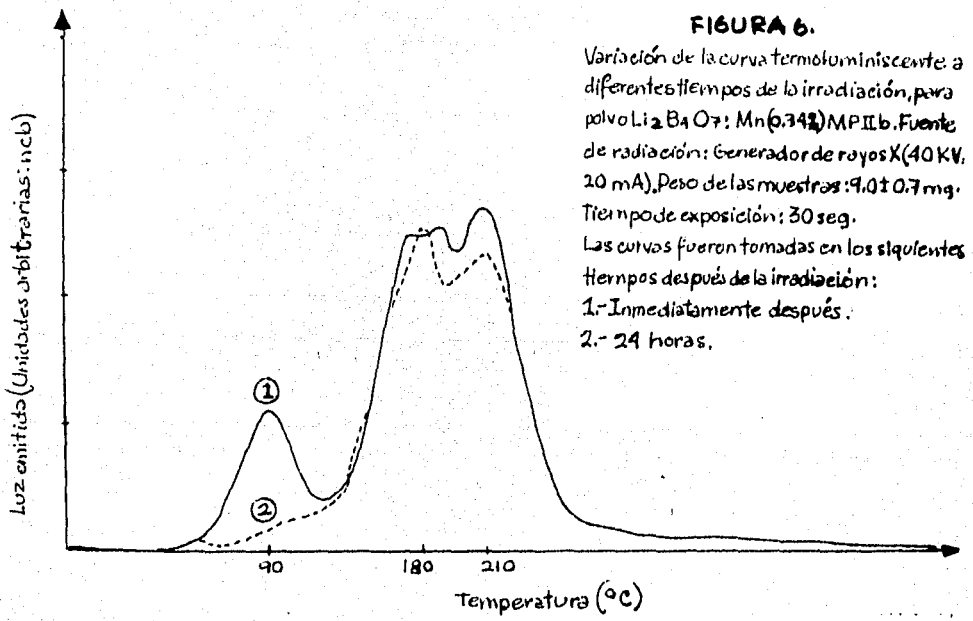


FIGURA 6.

Variación de la curva termoluminiscente a diferentes tiempos de la irradiación, para polvo $Li_2B_4O_7$: Mn(0.3%) MP II b. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Tiempo de exposición: 30 seg.
Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:
1.- Inmediatamente después.
2.- 24 horas.

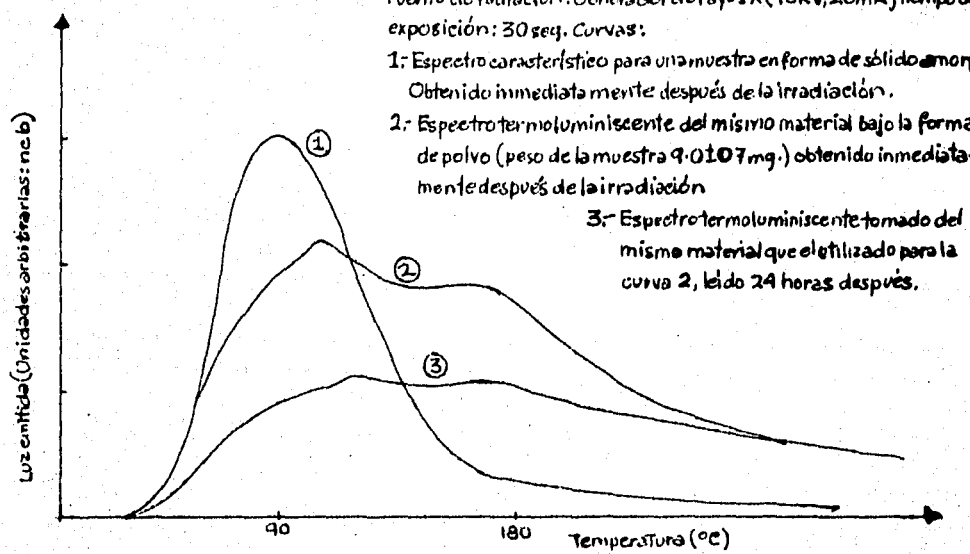


FIGURA 7.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.3%) MP II a.
Fuente de radiación: Generador de rayos X (40KV, 20mA) tiempo de exposición: 30 seg. Curvas:
1.- Espectro característico para una muestra en forma de sólido amorfo obtenido inmediatamente después de la irradiación.
2.- Espectro termoluminiscente del mismo material bajo la forma de polvo (peso de la muestra 9.0 ± 0.7 mg.) obtenido inmediatamente después de la irradiación
3.- Espectro termoluminiscente tomado del mismo material que el utilizado para la curva 2, leído 24 horas después.

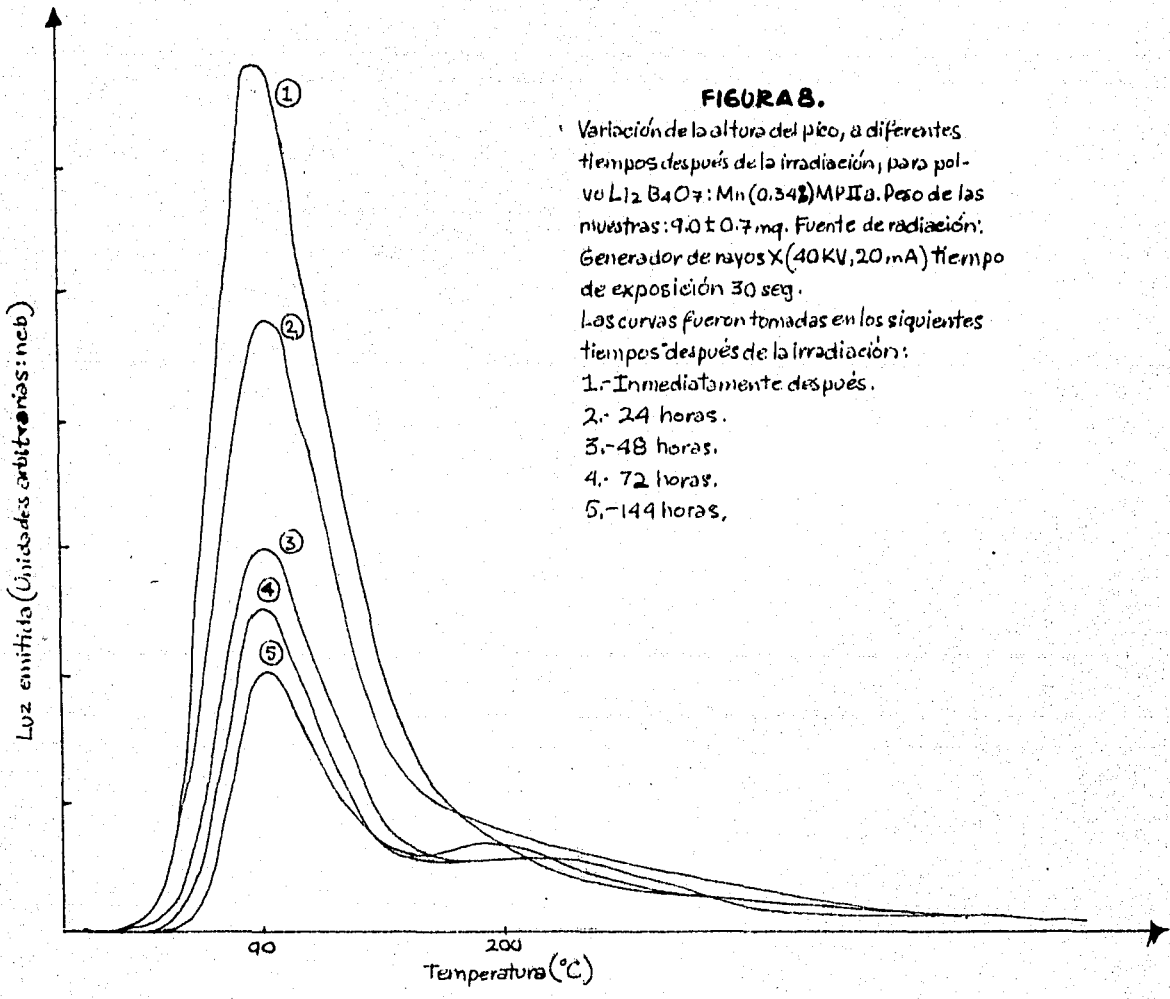


FIGURA 8.

Variación de la altura del pico, a diferentes tiempos después de la irradiación, para polvo $Li_2B_4O_7:Mn$ (0.34%) MP IIa. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA) tiempo de exposición 30 seg.

Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

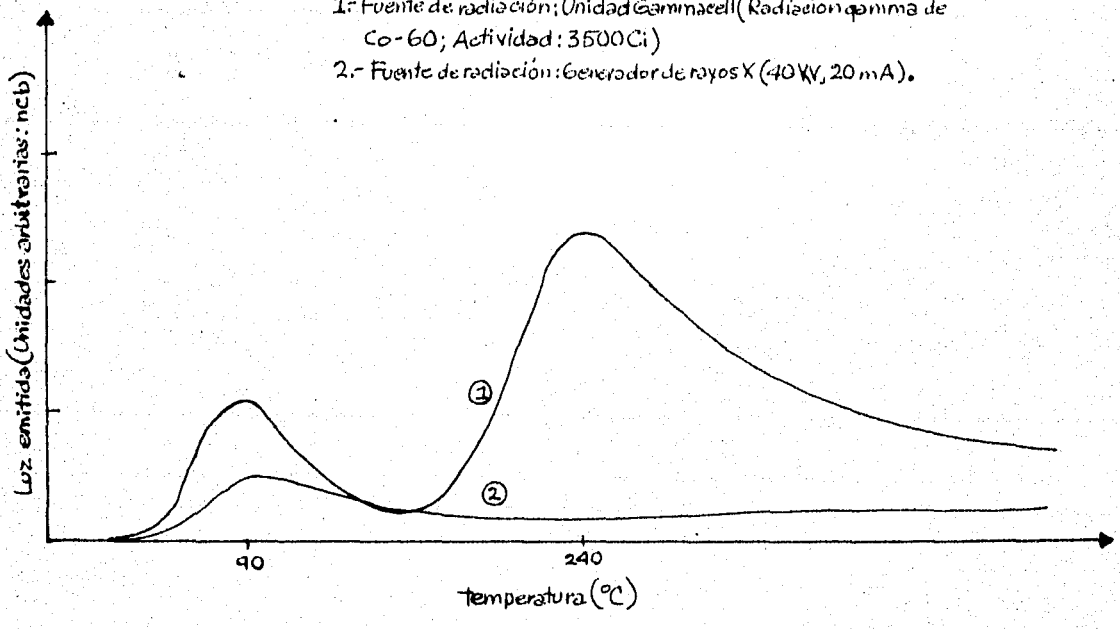
1.- Inmediatamente después.
2.- 24 horas.
3.- 48 horas.
4.- 72 horas.
5.- 144 horas.

FIGURA 9.

Espectro Termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7:Mn$ (0.34%), MPIIa. Peso de las muestras 9.0 ± 0.7mg. Curvas:

1.- Fuente de radiación; Unidad Gammacell (Radiación gamma de Co-60; Actividad: 3500 Ci)

2.- Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA).



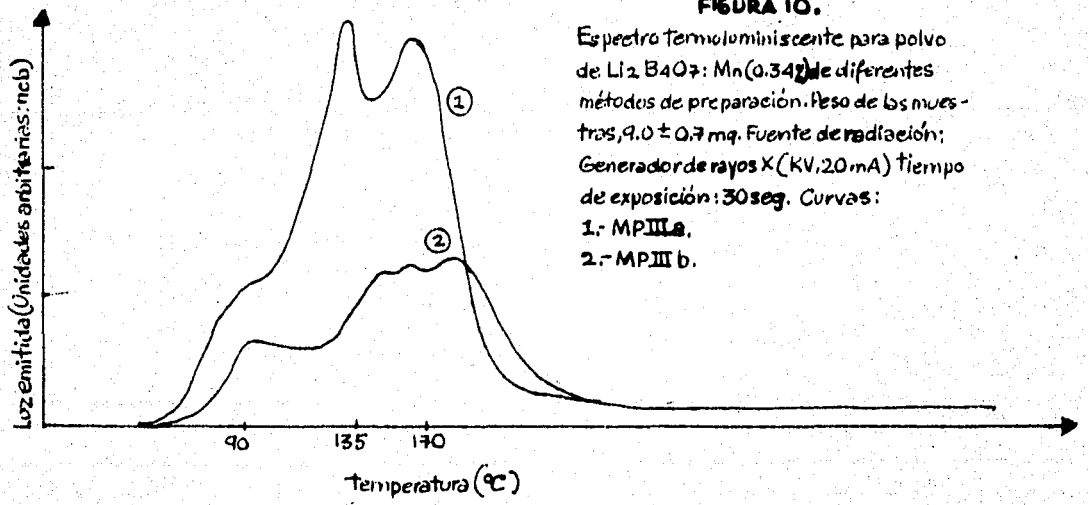


FIGURA 10.

Espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn(0.34%) de diferentes métodos de preparación. Peso de las muestras, 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación; Generador de rayos X (KV, 20 mA) tiempo de exposición: 30 seg. Curvas:

1.- MP III a.

2.- MP III b.

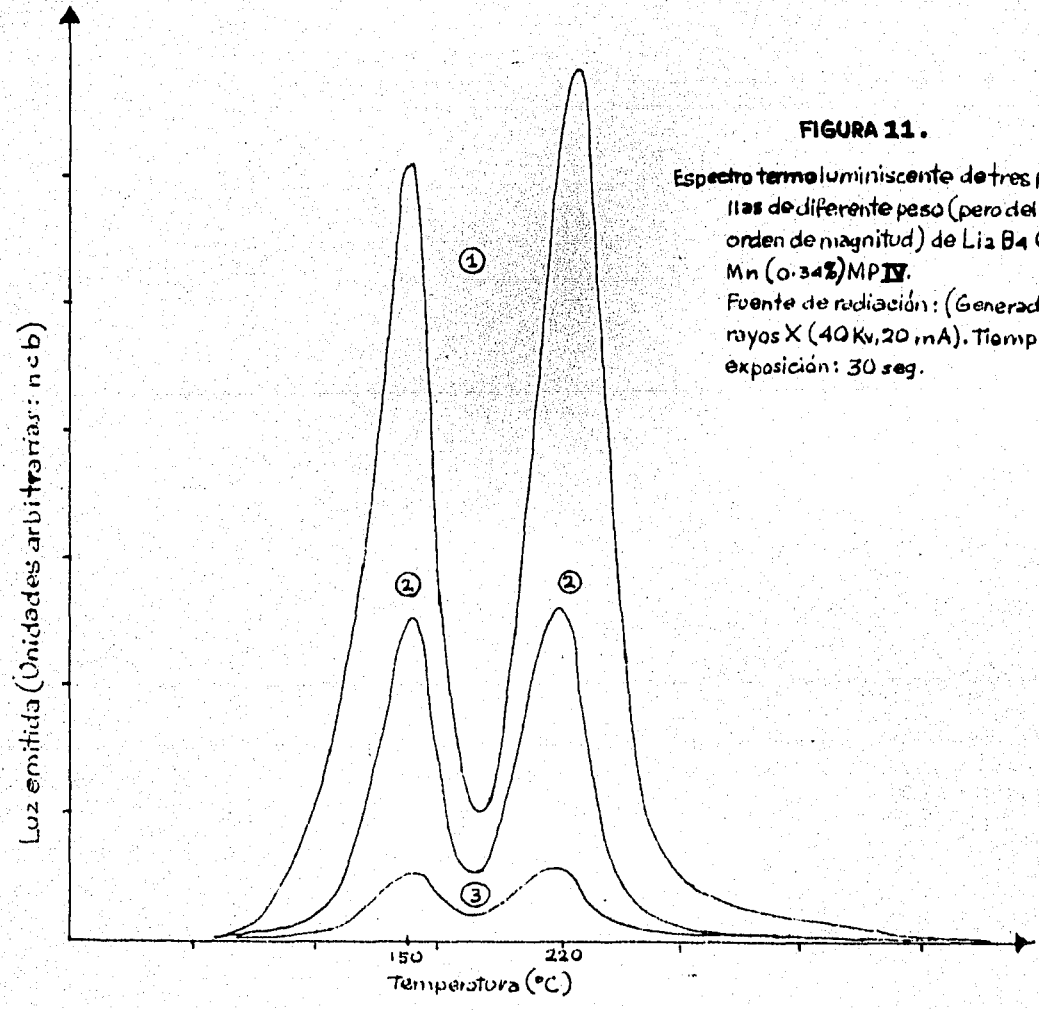


FIGURA 11.

Espectro termoluminiscente de tres pastillas de diferente peso (pero del mismo orden de magnitud) de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%) MP IV.
Fuente de radiación: (Generador de rayos X (40 Kv, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.

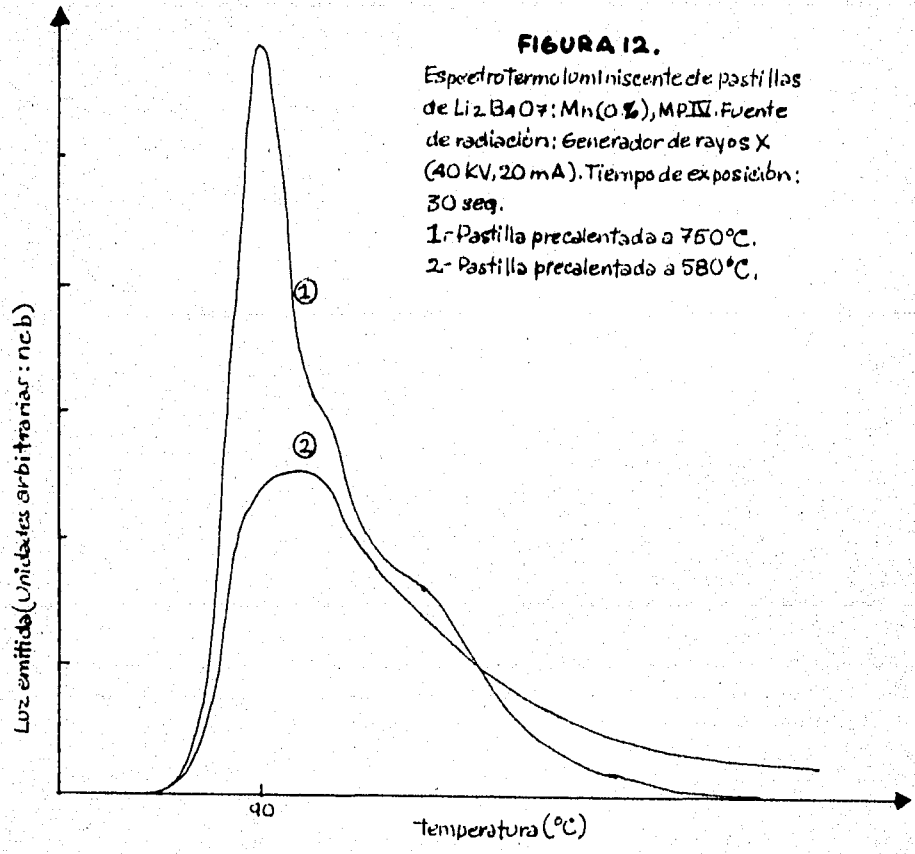


FIGURA 12.

Espectrotermoluminiscente de pastillas de $Li_2B_4O_7$: Mn(0.1%), MP III. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.

1.- Pastilla precalentada a 750°C.

2.- Pastilla precalentada a 580°C.

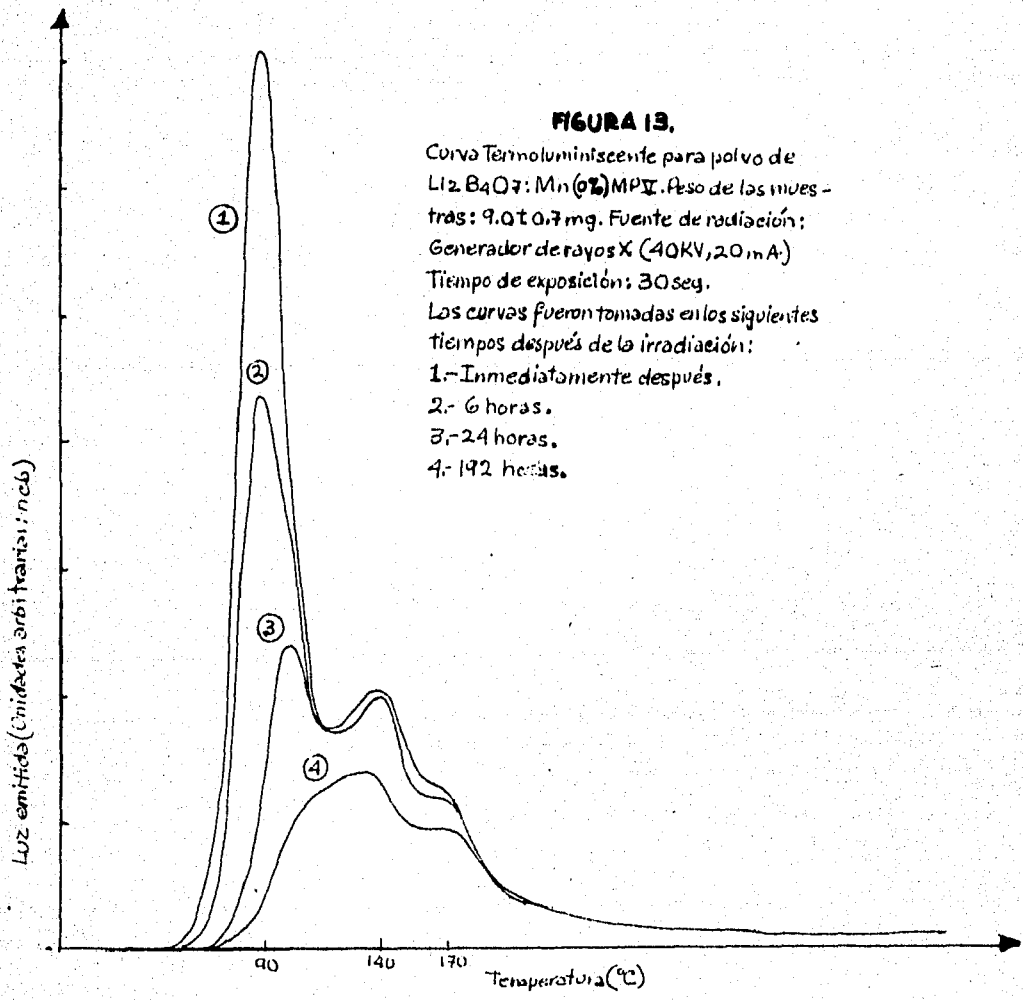


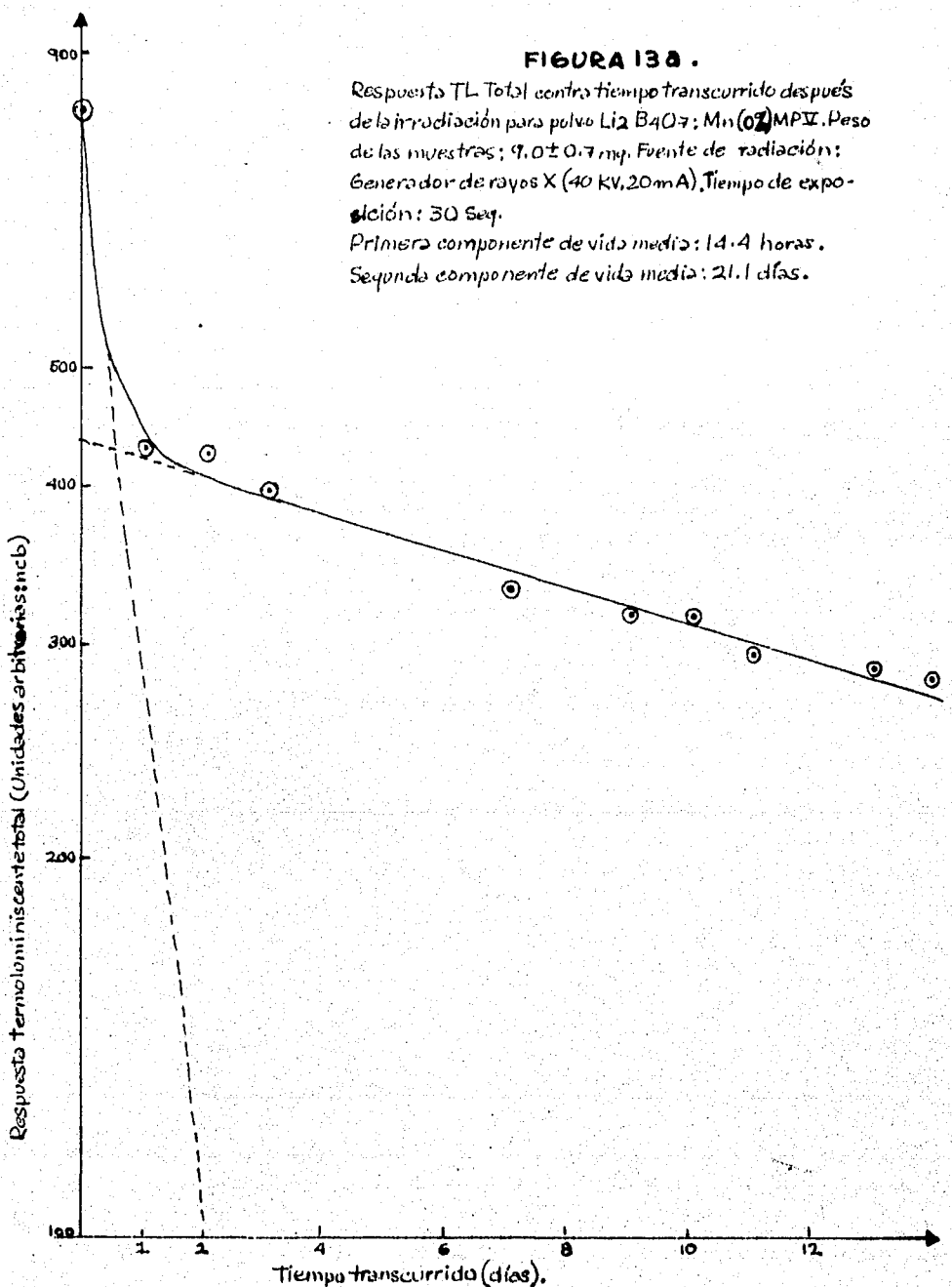
FIGURA 13.

Curva Termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7:Mn$ (0%) MP∑. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40KV, 20 mA) Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.
2.- 6 horas.
3.- 24 horas.
4.- 192 horas.

FIGURA 13a.

Respuesta TL Total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para polvo $Li_2B_4O_7:Mn$ (0.2 MPI. Peso de las muestras; 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 Seg.
Primera componente de vida media: 14.4 horas.
Segunda componente de vida media: 21.1 días.



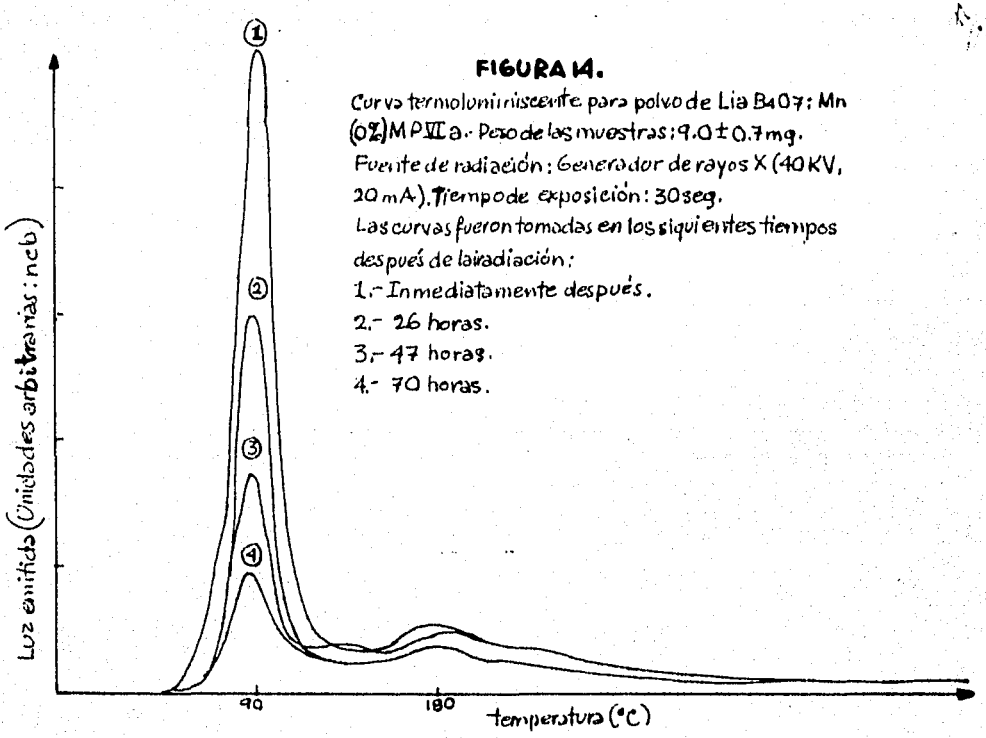


FIGURA 14.

Curva termoluminiscente para polvo de Lia B407: Mn (0%) MP VII a. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.
2.- 26 horas.
3.- 47 horas.
4.- 70 horas.

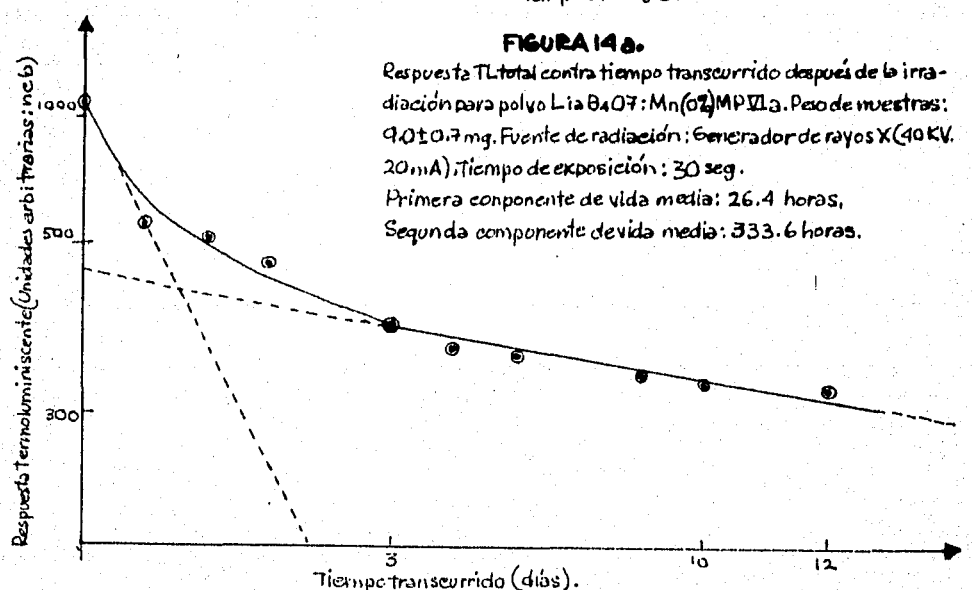


FIGURA 14 a.

Respuesta TL total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para polvo Lia B407: Mn (0%) MP VII a. Peso de muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.

Primera componente de vida media: 26.4 horas,
Segunda componente de vida media: 333.6 horas.

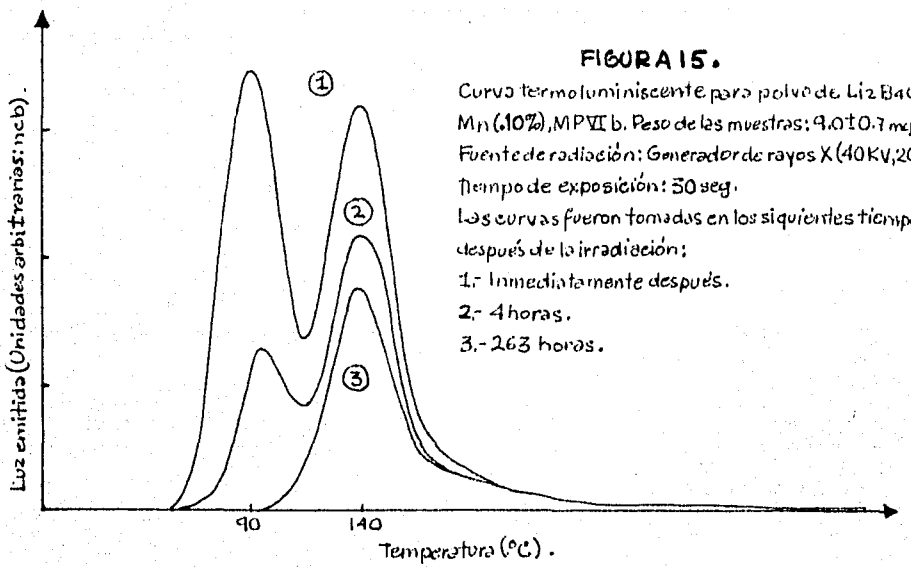


FIGURA 15.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.10%), MP VII b. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA) Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.

2.- 4 horas.

3.- 263 horas.

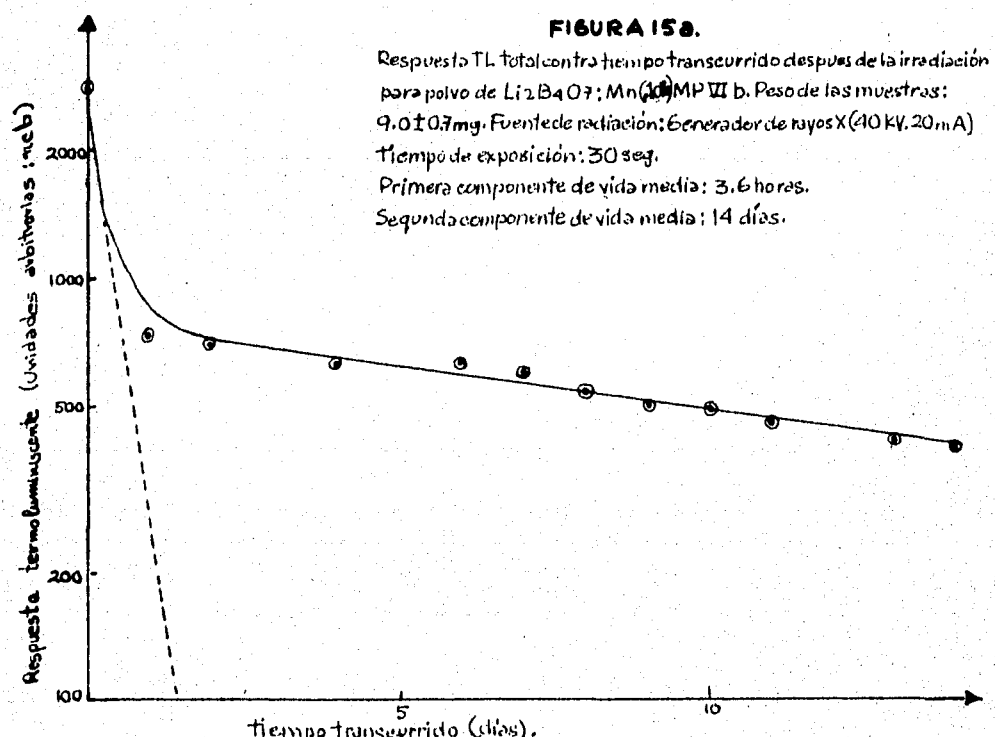


FIGURA 15a.

Respuesta TL total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.1%) MP VII b. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA) Tiempo de exposición: 30 seg. Primera componente de vida media: 3.6 horas. Segunda componente de vida media: 14 días.

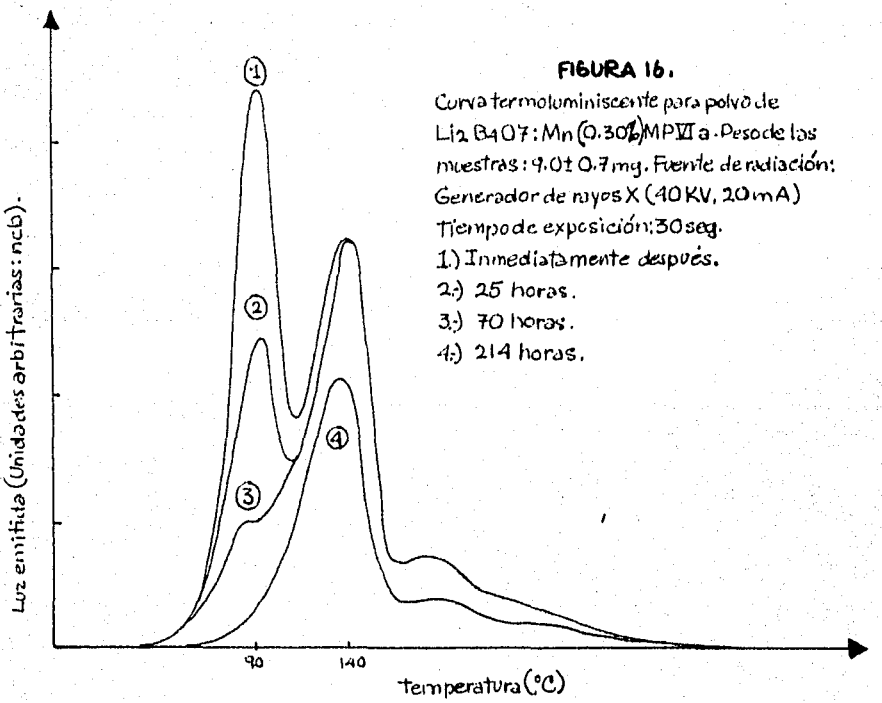
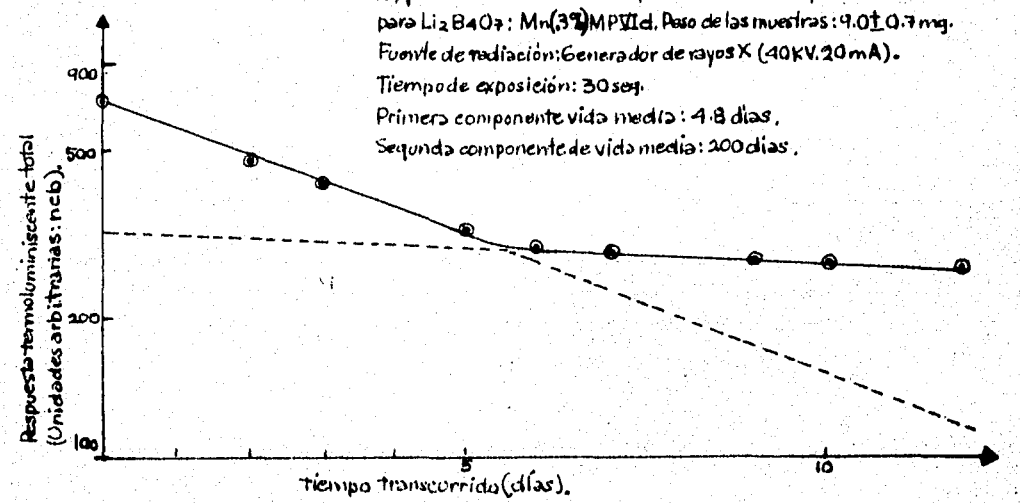


FIGURA 16.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.30%) MP VI a. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA)
Tiempo de exposición: 30 seg.
1.) Inmediatamente después.
2.) 25 horas.
3.) 70 horas.
4.) 214 horas.

FIGURA 16 a.

Respuesta TL total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para $Li_2B_4O_7$: Mn (3%) MP VI d. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg.
Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA).
Tiempo de exposición: 30 seg.
Primera componente vida media: 4.8 días.
Segunda componente de vida media: 200 días.



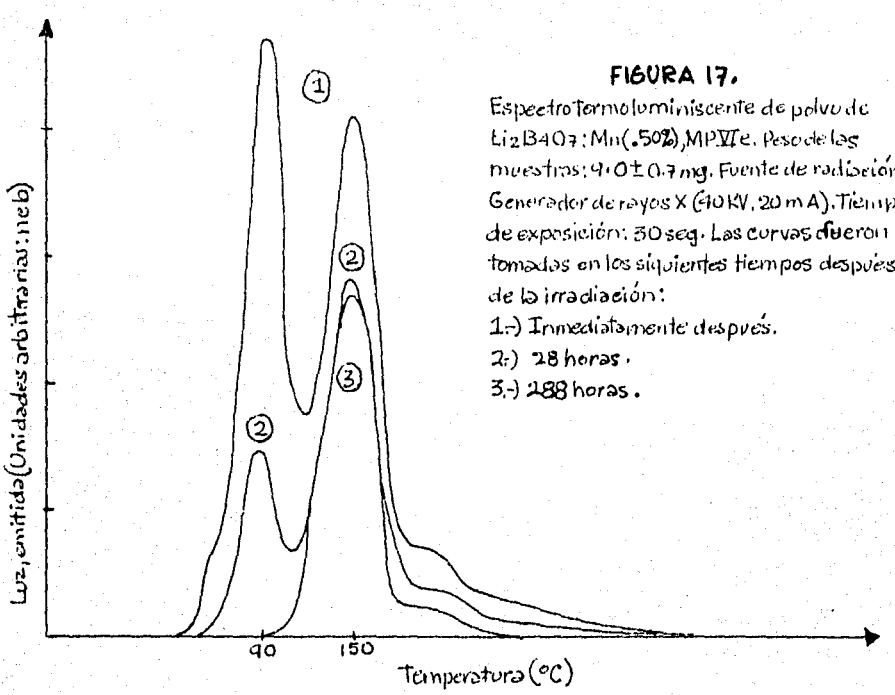


FIGURA 17.

Espectro termoluminiscente de polvo de $Li_2B_4O_7:Mn(.50\%)$, MPVIe. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.-) Inmediatamente después.
2.-) 28 horas.
3.-) 288 horas.

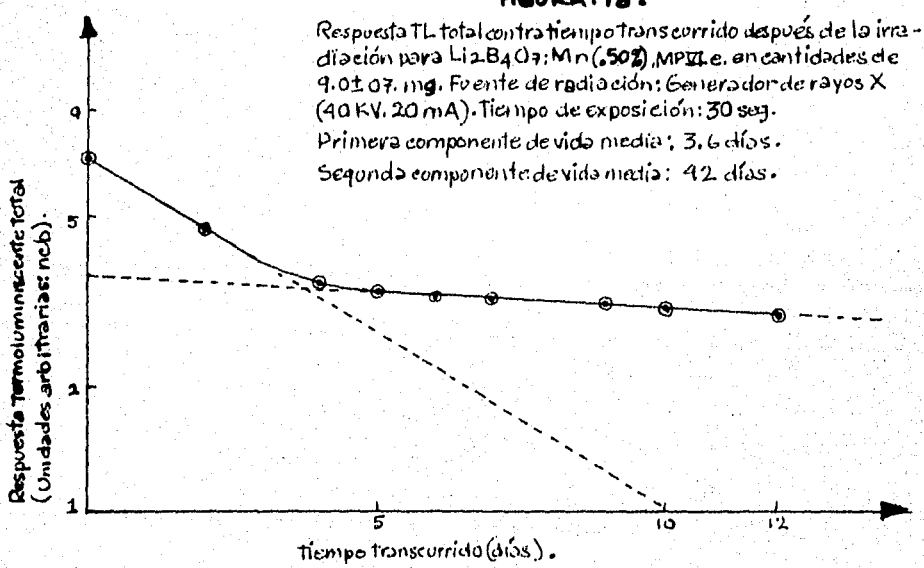


FIGURA 17a.

Respuesta TL total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para $Li_2B_4O_7:Mn(.50\%)$, MPVIe. en cantidades de 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.
Primera componente de vida media: 3.6 días.
Segunda componente de vida media: 42 días.

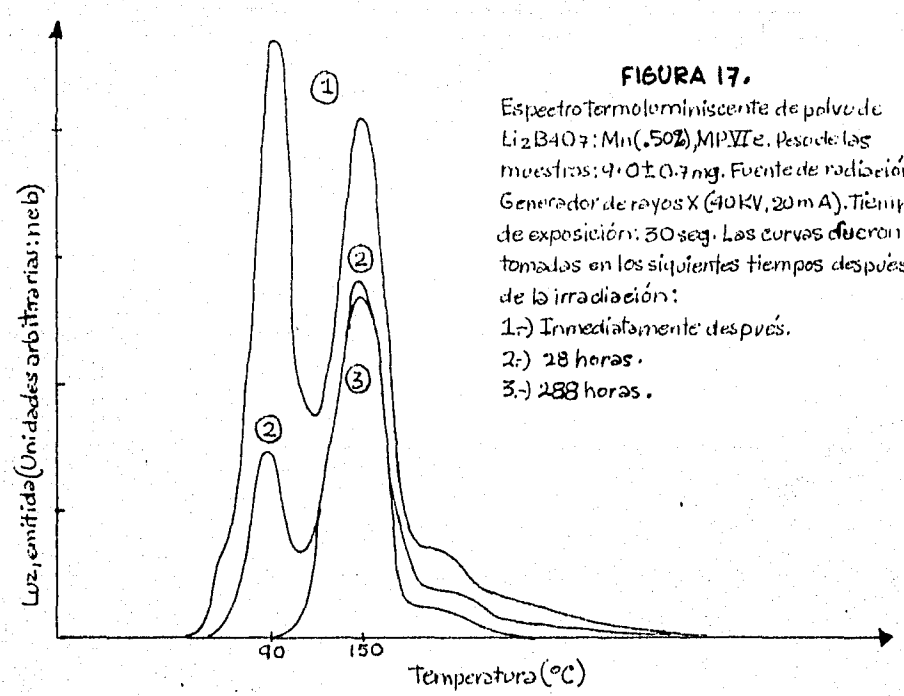


FIGURA 17.

Espectro termoluminiscente de polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(.50%),MPVIe. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.-) Inmediatamente después.

2.-) 28 horas.

3.-) 288 horas.

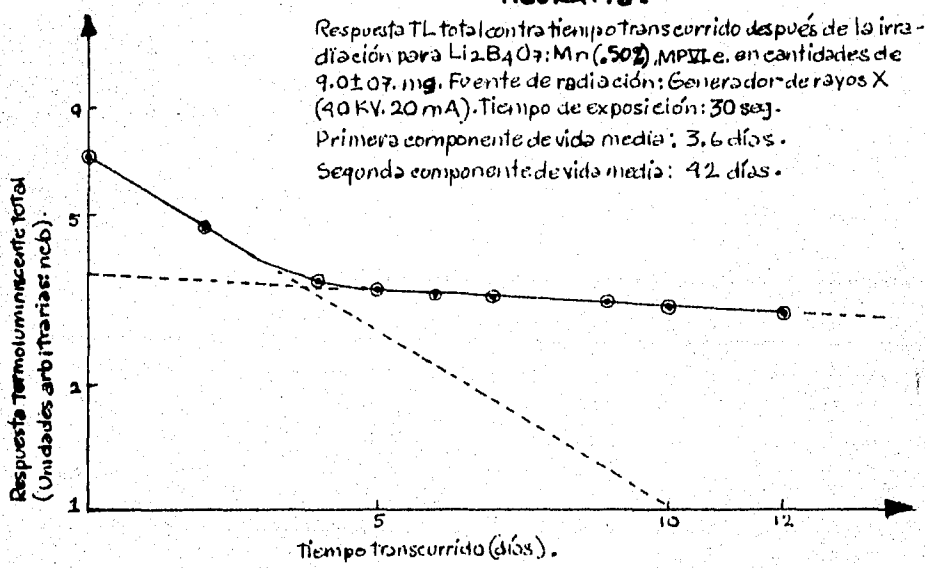


FIGURA 17a.

Respuesta TL total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para $Li_2B_4O_7$:Mn(.50%),MPVIe. en cantidades de 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.

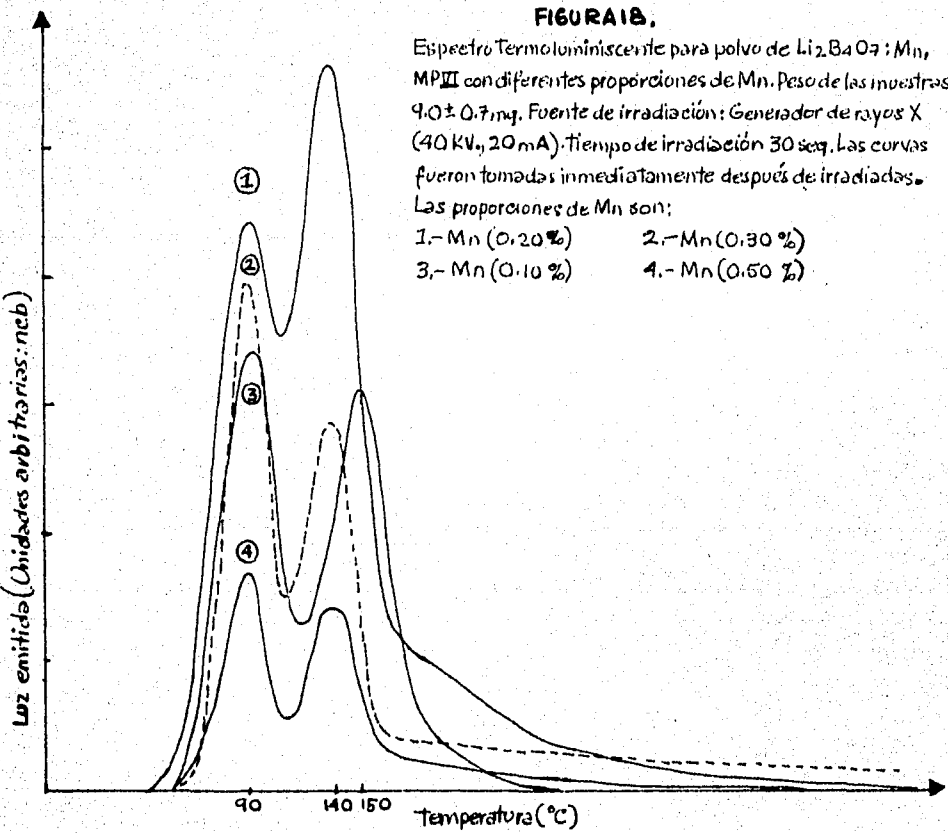
Primera componente de vida media: 3.6 días.

Segunda componente de vida media: 42 días.

FIGURA 18.

Espectro Termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7:Mn$, MP III con diferentes proporciones de Mn. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de irradiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de irradiación 30 seg. Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de irradiadas. Las proporciones de Mn son:

1.- Mn (0.20 %) 2.- Mn (0.30 %)
3.- Mn (0.10 %) 4.- Mn (0.50 %)



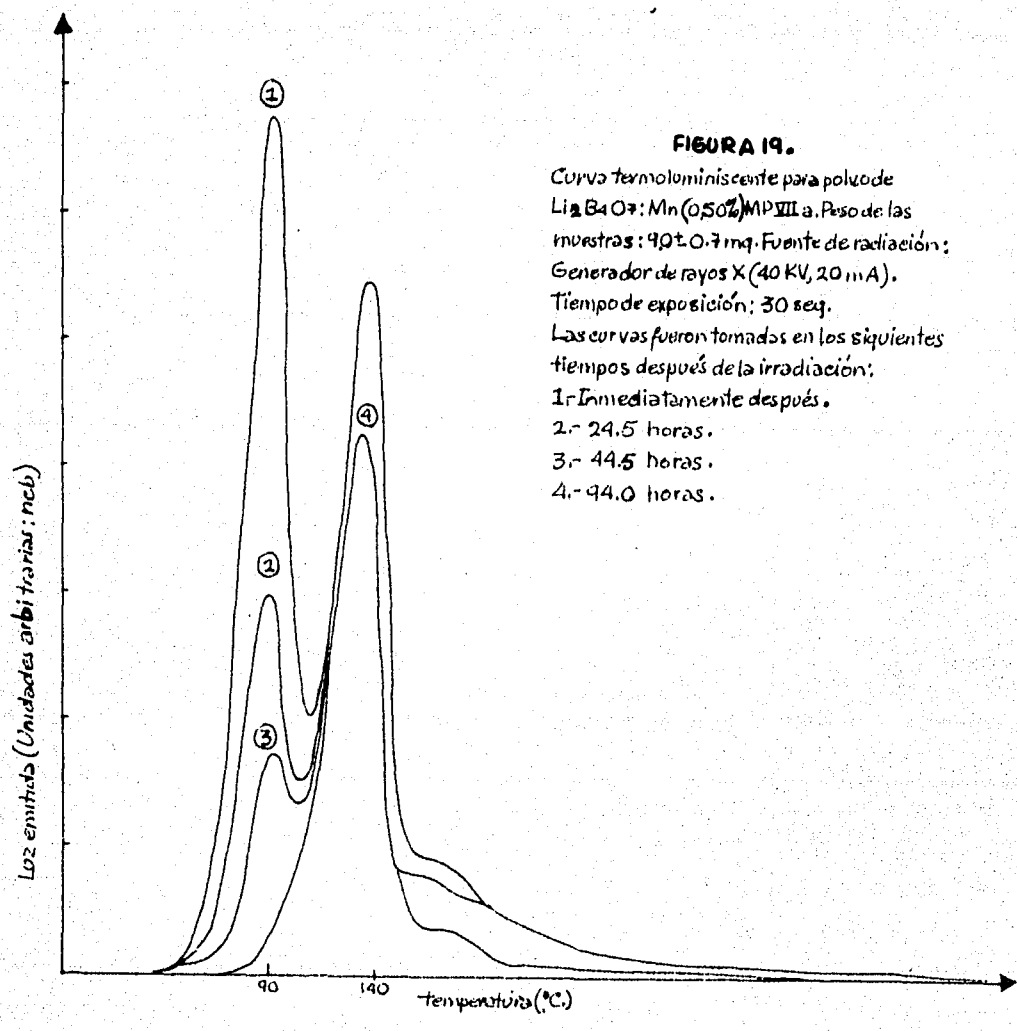


FIGURA 19.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7:Mn(0,50\%)$ MP III a. Peso de las muestras: 90 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.
2.- 24.5 horas.
3.- 44.5 horas.
4.- 94.0 horas.

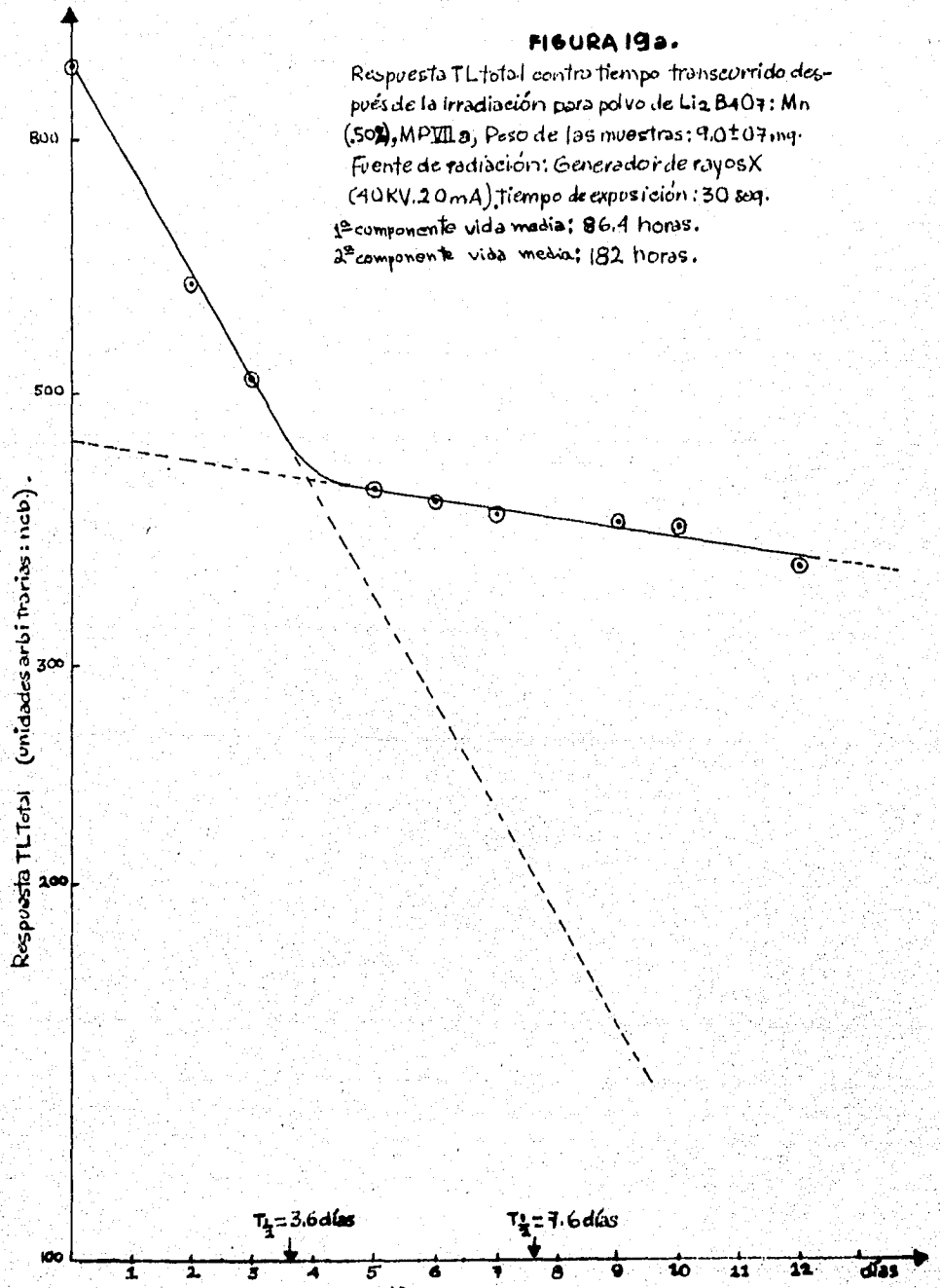


FIGURA 19a.

Respuesta TL total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.50%), MP VII a, Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.

1ª componente vida media: 86.4 horas.

2ª componente vida media: 182 horas.

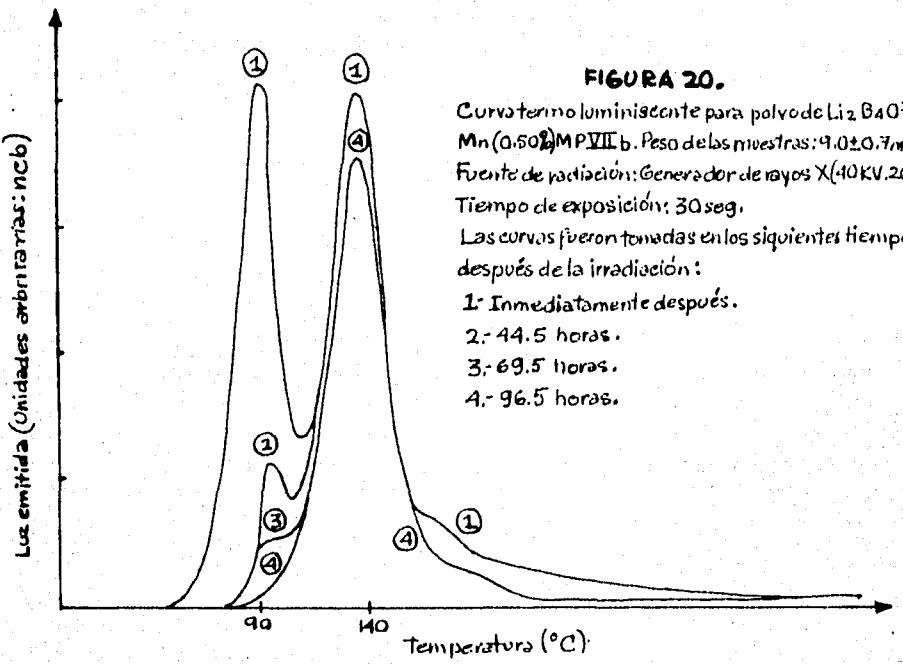


FIGURA 20.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.50%) MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.
2.- 44.5 horas.
3.- 69.5 horas.
4.- 96.5 horas.

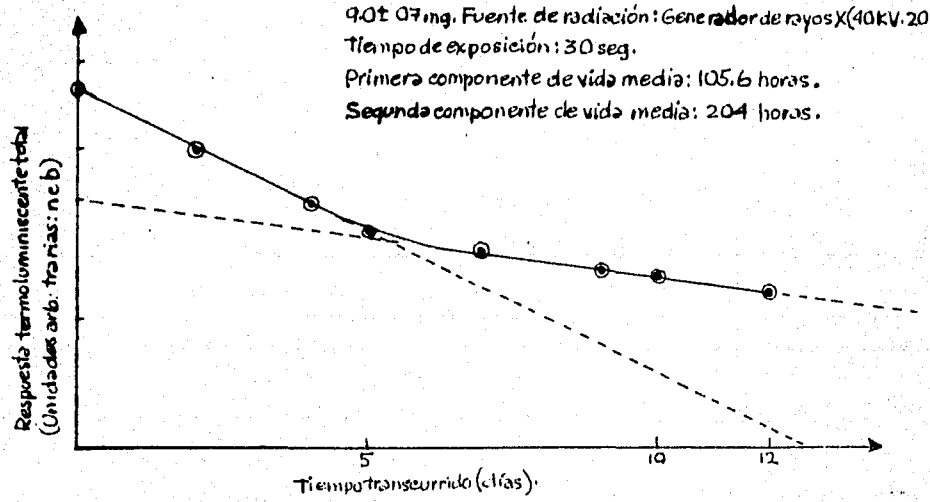


FIGURA 20a

Respuesta TL total contra tiempo transcurrido después de la irradiación para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.50%) MP VIII b. en cantidades de 9.01 .07 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.

Primera componente de vida media: 105.6 horas.

Segunda componente de vida media: 204 horas.

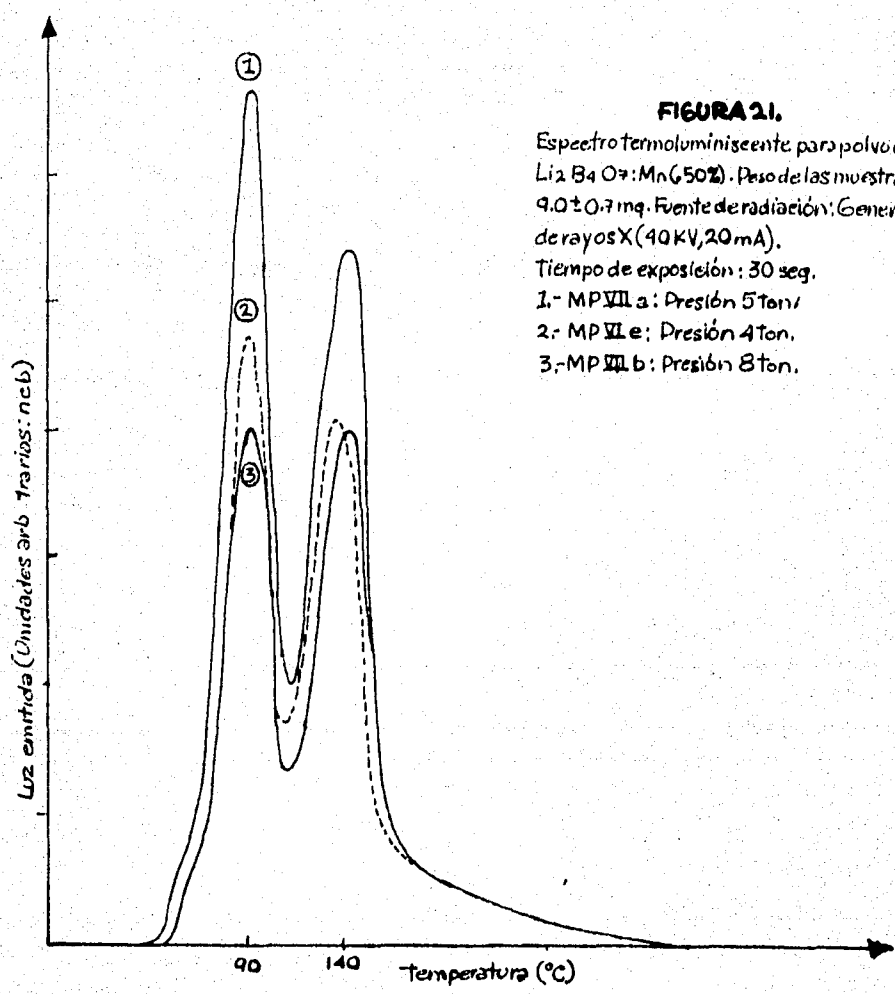


FIGURA 21.

Espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7:Mn(.50\%)$. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA).
Tiempo de exposición: 30 seg.
1.- MP VII a: Presión 5 Ton/
2.- MP VII e: Presión 4 Ton.
3.- MP VII b: Presión 8 Ton.

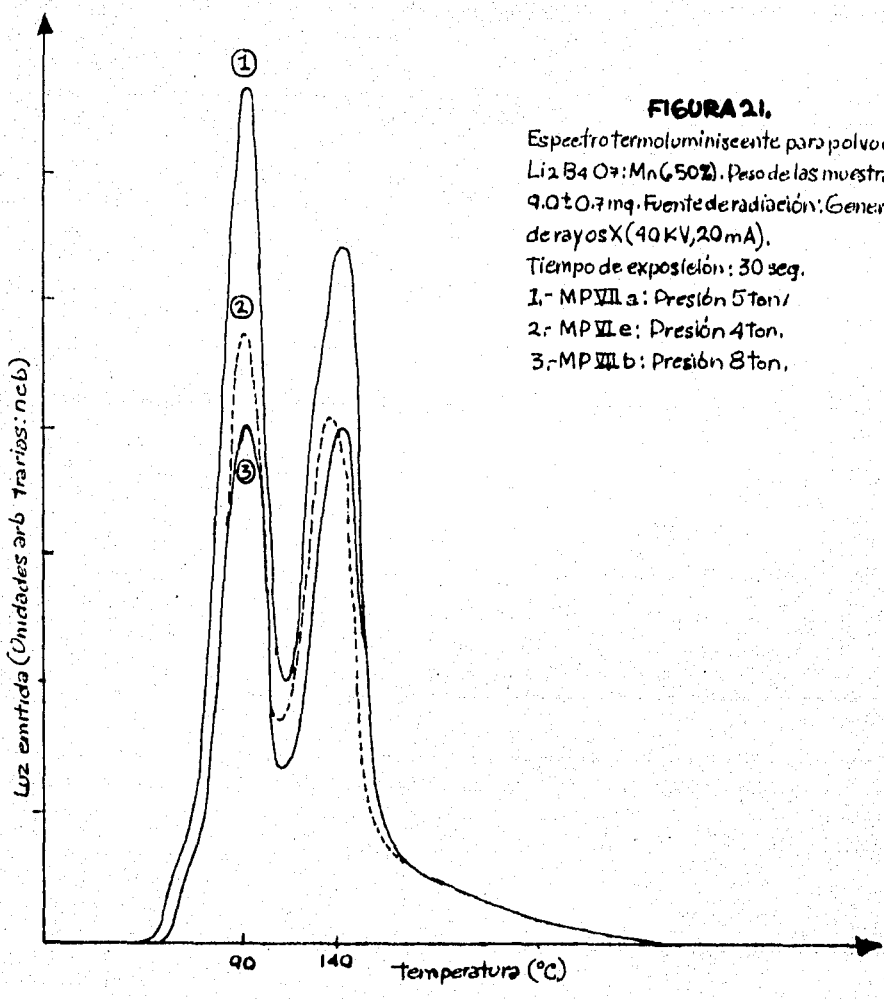


FIGURA 21.

Espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7:Mn$ (.50%). Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA).
Tiempo de exposición: 30 seg.
1.- MP VII a: Presión 5 ton/
2.- MP VII e: Presión 4 ton.
3.- MP VII b: Presión 8 ton.

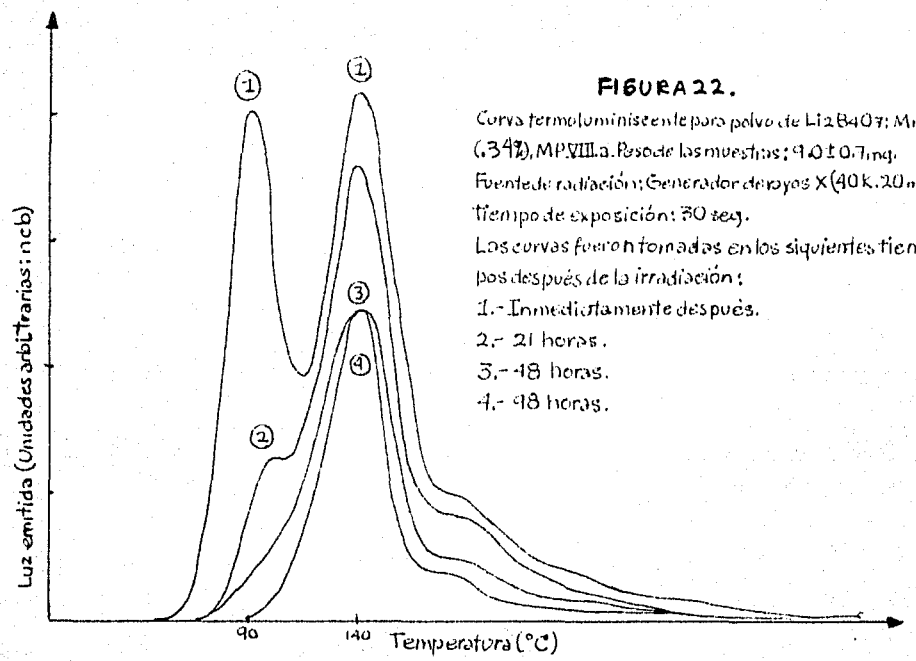


FIGURA 22.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.34%), MP.VIII.a. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 k. 20 mA) Tiempo de exposición: 30 seg.
Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:
1.- Inmediatamente después.
2.- 21 horas.
3.- 48 horas.
4.- 98 horas.

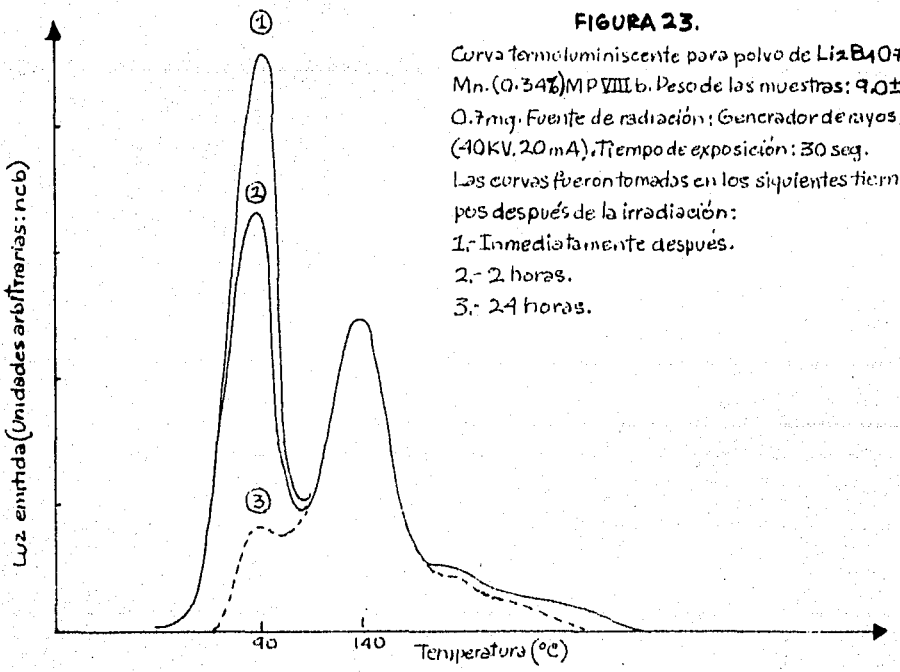


FIGURA 23.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn. (0.34%) MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg.
Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:
1.- Inmediatamente después.
2.- 2 horas.
3.- 24 horas.

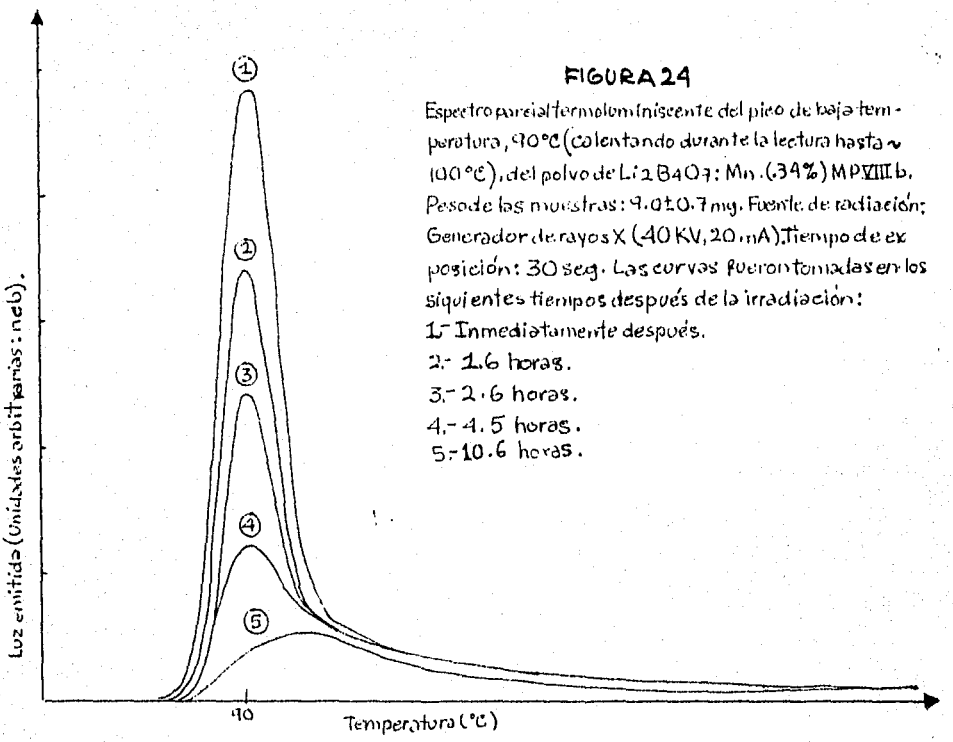


FIGURA 24

Espectro parcial termoluminiscente del pico de baja temperatura, 90°C (calentando durante la lectura hasta ~ 100°C), del polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.34%) MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.
2.- 1.6 horas.
3.- 2.6 horas.
4.- 4.5 horas.
5.- 10.6 horas.

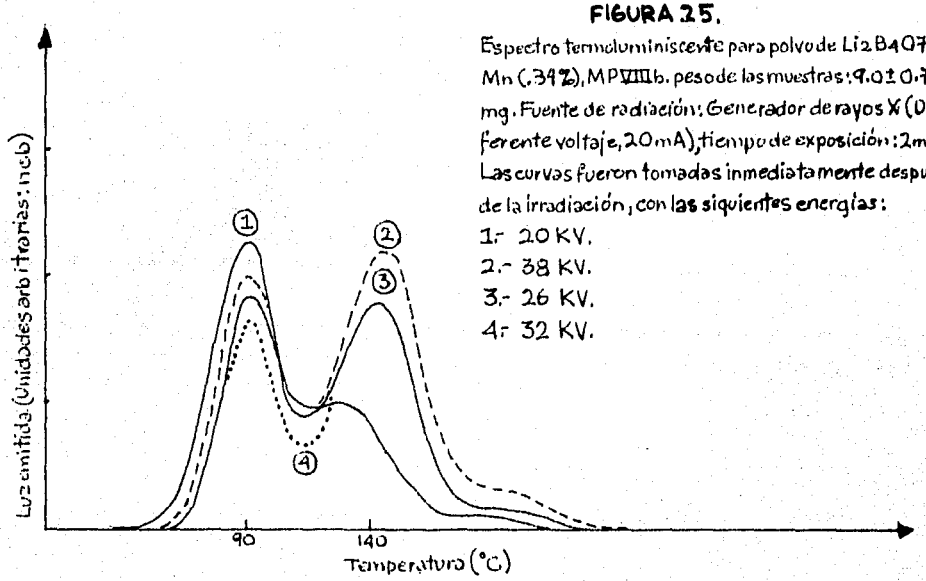


FIGURA 25.

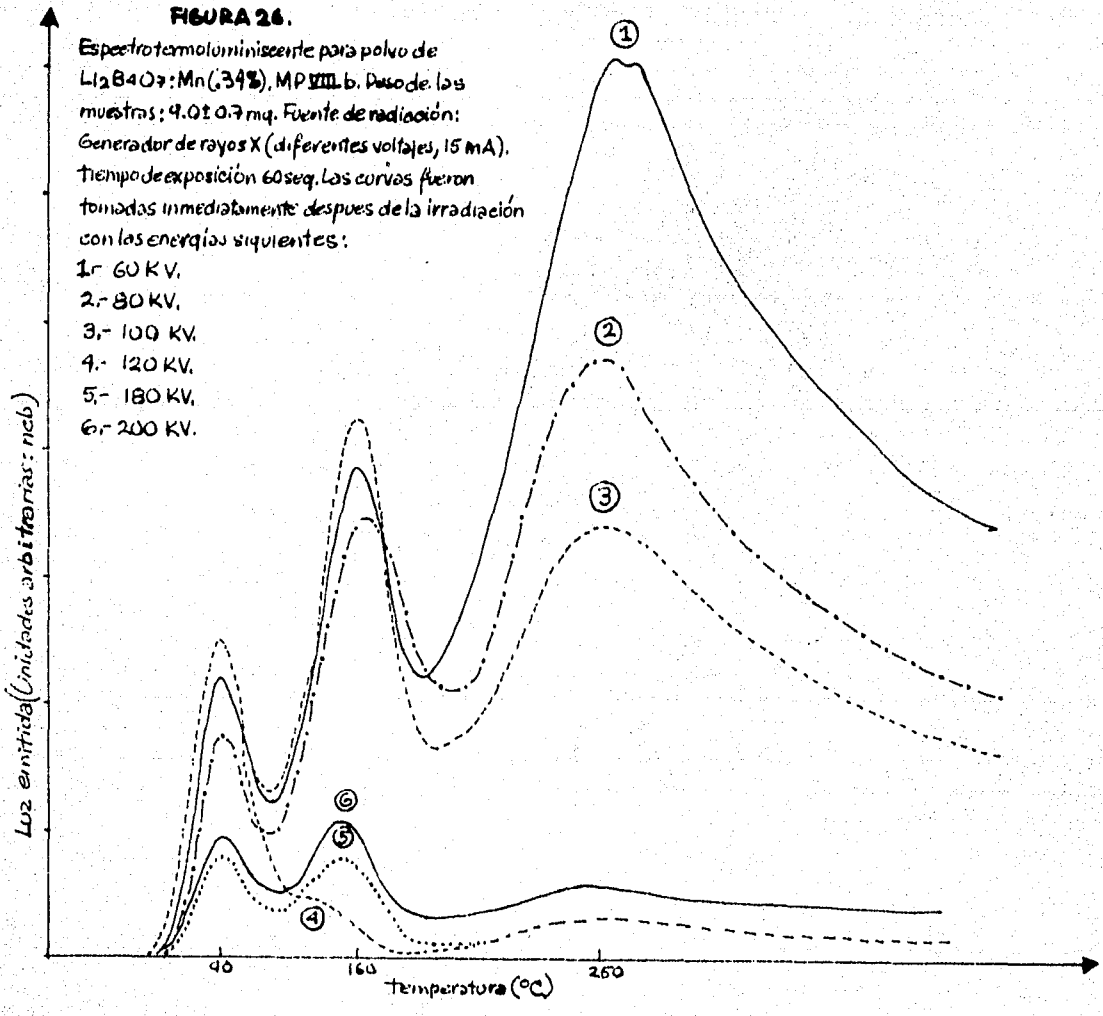
Espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.34%), MP VIII b. peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (Diferente voltaje, 20 mA), tiempo de exposición: 2 mm. Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de la irradiación, con las siguientes energías:

1.- 20 KV.
2.- 38 KV.
3.- 26 KV.
4.- 32 KV.

FIGURA 26.

Espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7:Mn$ (.3%), MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (diferentes voltajes, 15 mA). Tiempo de exposición 60 seg. Las curvas fueron tomadas inmediatamente despues de la irradiación con las energías siguientes:

1.- 60 KV.
2.- 80 KV.
3.- 100 KV.
4.- 120 KV.
5.- 180 KV.
6.- 200 KV.



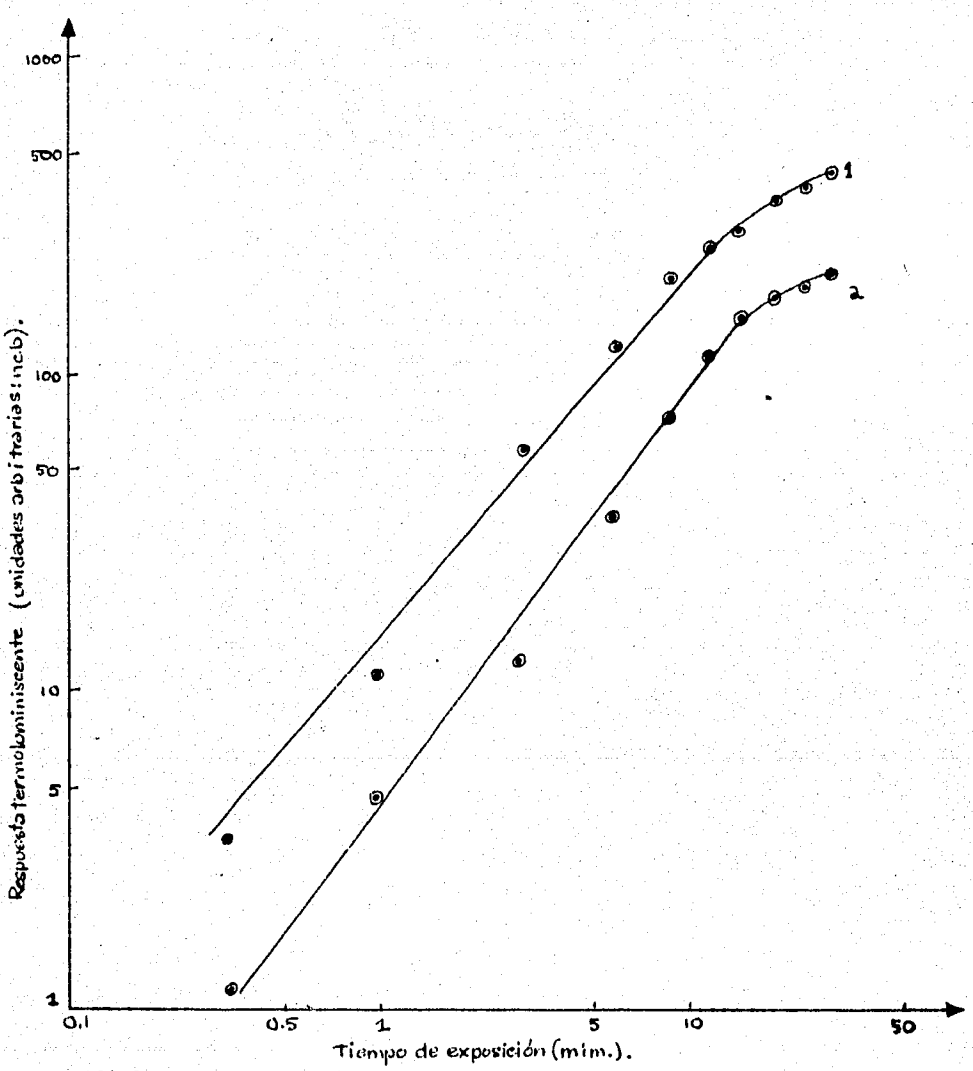


FIGURA 27. Respuesta termoluminiscente del pico de baja temperatura (90°C), contra tiempo de exposición del polvo de $Li_2B_4O_7:Mn$ (.34%), MP VII b. Peso de las muestras: 9.01 0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gammacell (Radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci). – Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.

2.- 24 horas.

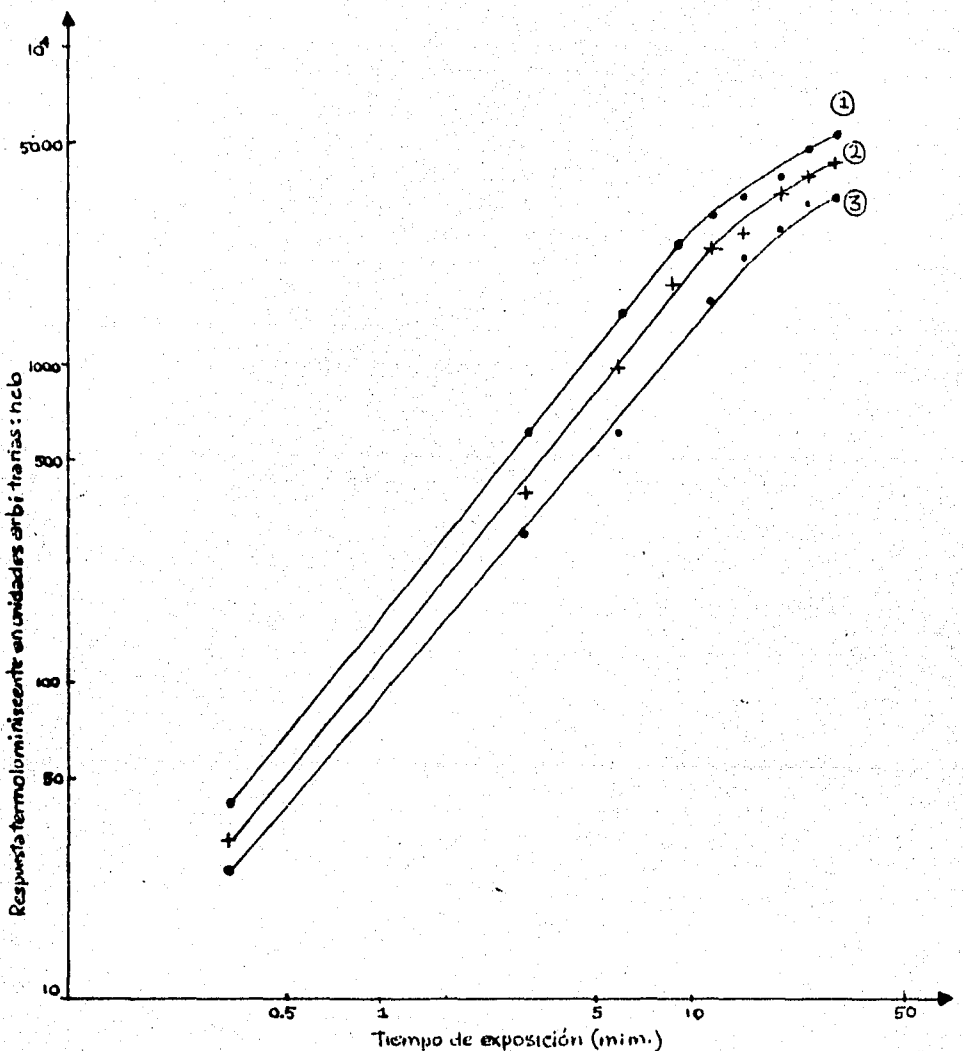


FIGURA 28. Respuesta termoluminiscente de los picos de alta temperatura (140°C, 250°C) contra tiempo de exposición del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn (.3%) MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gammacell (Radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci).- Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.

2.- 24 horas.

3.- 144 horas.

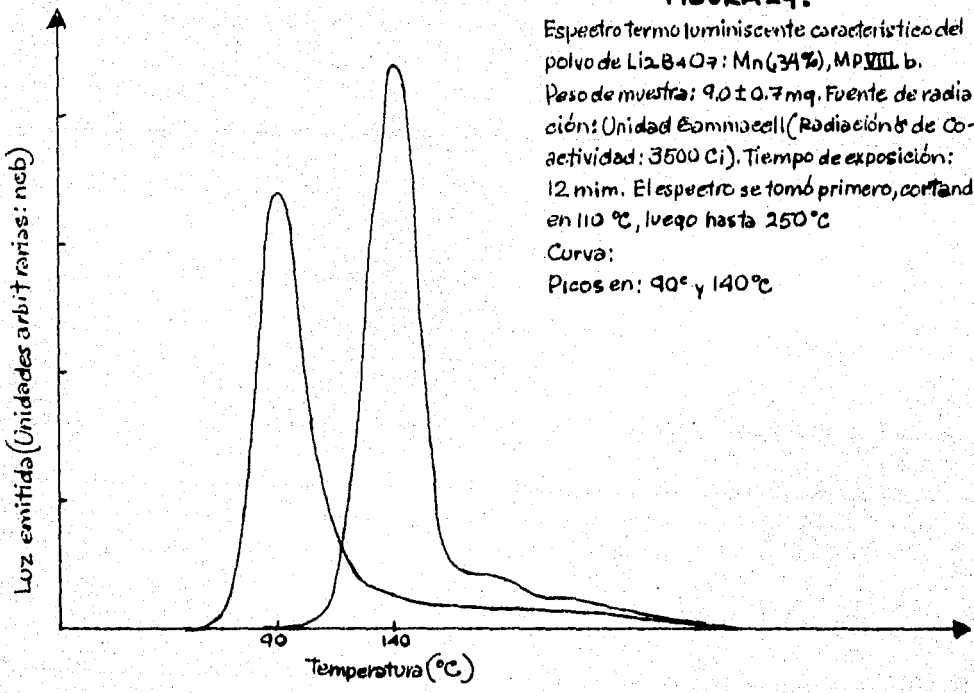


FIGURA 29.

Espectro termoluminiscente característico del polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.34%), MP VIII b.
Peso de muestra: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gammacell (Radiación β de Co-60; actividad: 3500 Ci). Tiempo de exposición: 12 mim. El espectro se tomó primero, cortando en 110 °C, luego hasta 250 °C
Curva:
Picos en: 90° y 140°C

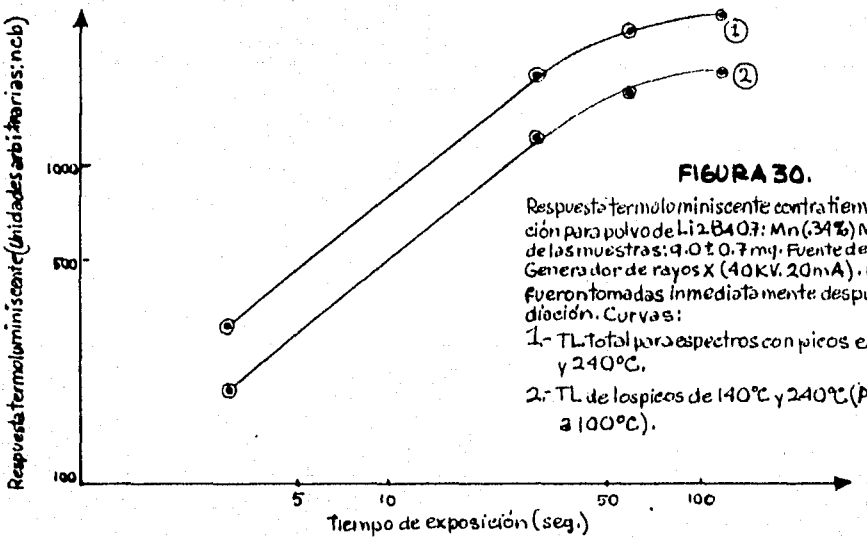


FIGURA 30.

Respuesta termoluminiscente contra tiempo de exposición para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.34%) MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA). Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de la irradiación. Curvas:

1.- TL total para espectros con picos en 40°C 140°C y 240°C.

2.- TL de los picos de 140°C y 240°C (Precalentados a 100°C).

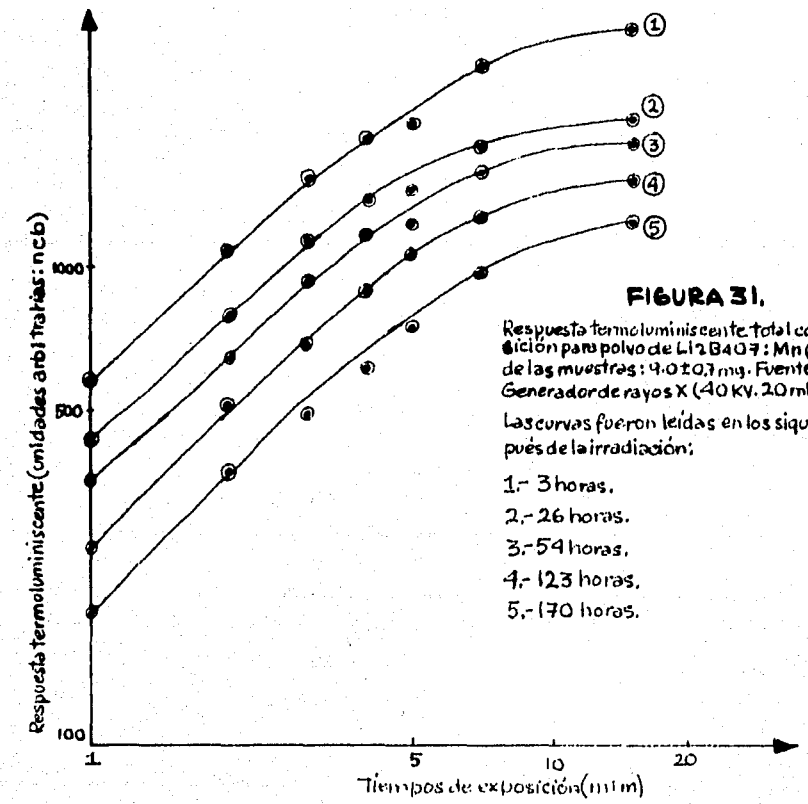


FIGURA 31.

Respuesta termoluminiscente total contra tiempo de exposición para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (.34%) MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA).

Las curvas fueron leídas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- 3 horas.

2.- 26 horas.

3.- 54 horas.

4.- 123 horas.

5.- 170 horas.

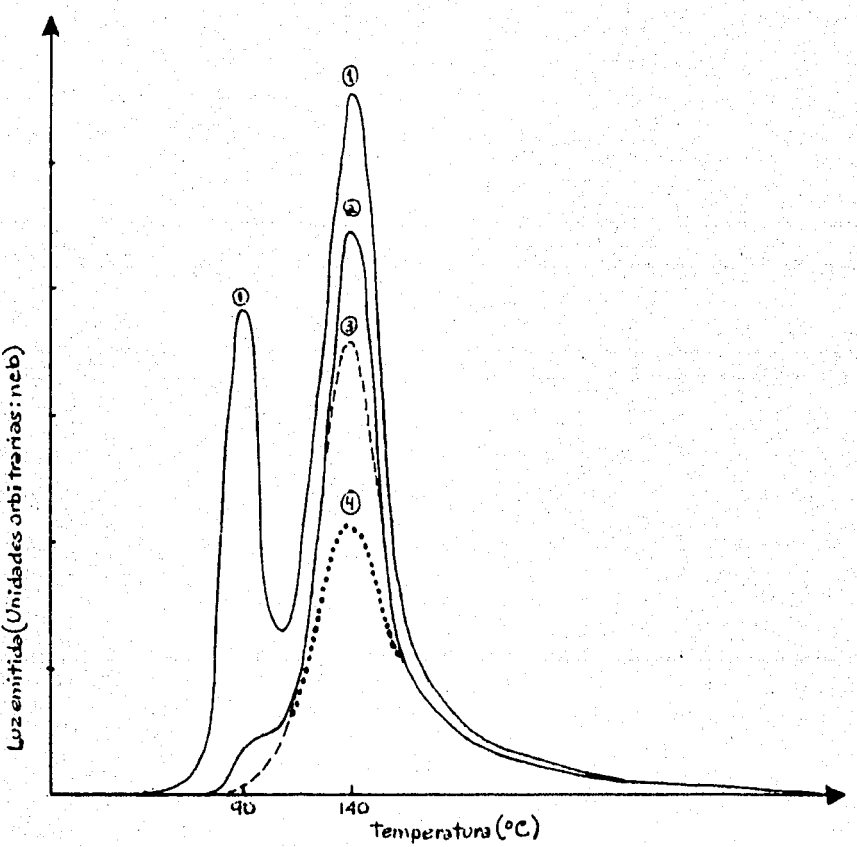


FIGURA 32. Curva termoluminiseente para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(.34%) MP III b. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40KV, 20mA). Tiempo de exposición: 15 mim.
Las curvas fueron tomadas a los siquientes tiempos después de la irradiación:
1.- 3 horas.
2.- 26 horas.
3.- 123 horas.
4.- 290 horas.

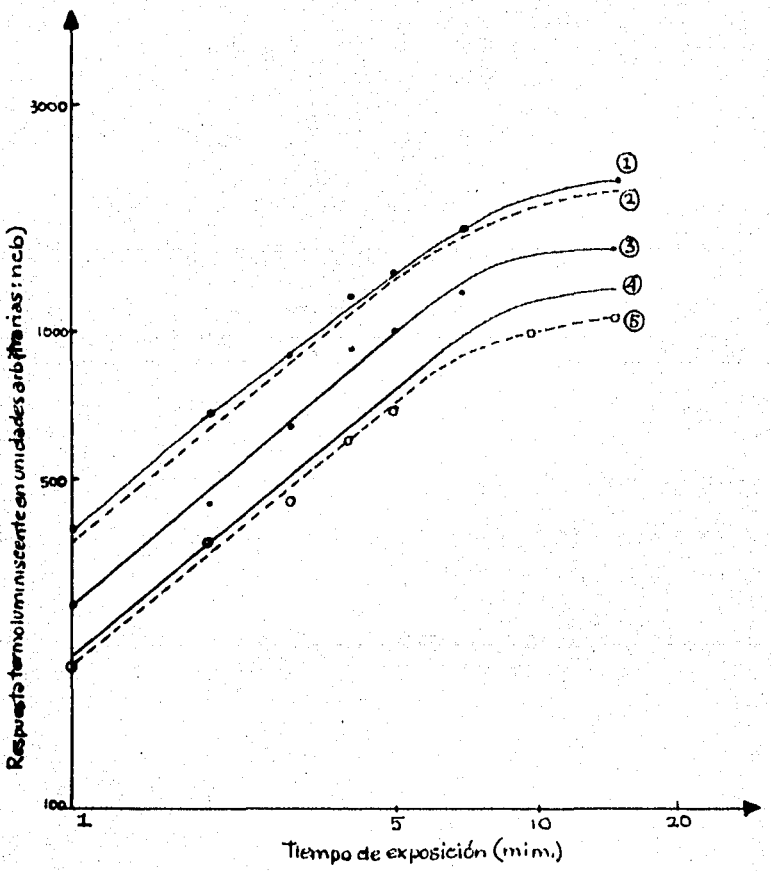


FIGURA 33. Respuesta termoluminiscente del pico de alta temperatura (140°C) precalentado a 100°C) contra tiempo de exposición, para polvo $Li_2B_4O_7$:Mn (0.34%) MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA) Las curvas fueron leídas en los siguientes tiempos despues de la irradiación:

1.- 5 horas.
2.- 25 horas.
3.- 124 horas.
4.- 171 horas.
5.- 290 horas.

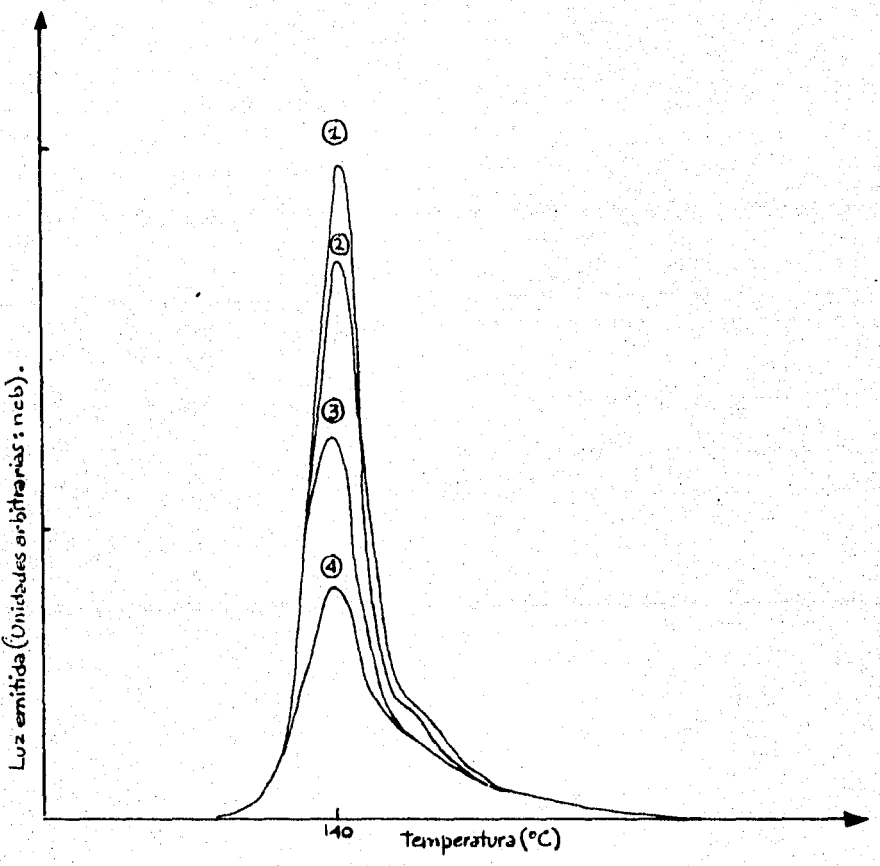


FIGURA 34. Espectro termoluminiscente característico del pico de alta temperatura (140°C, precalentado a 100°C para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%), MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV. 20 mA). Tiempo de exposición: 15 mim. Las curvas fueron leídas los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- 5 horas.
2.- 51 horas.
3.- 124 horas.
4.- 291 horas.

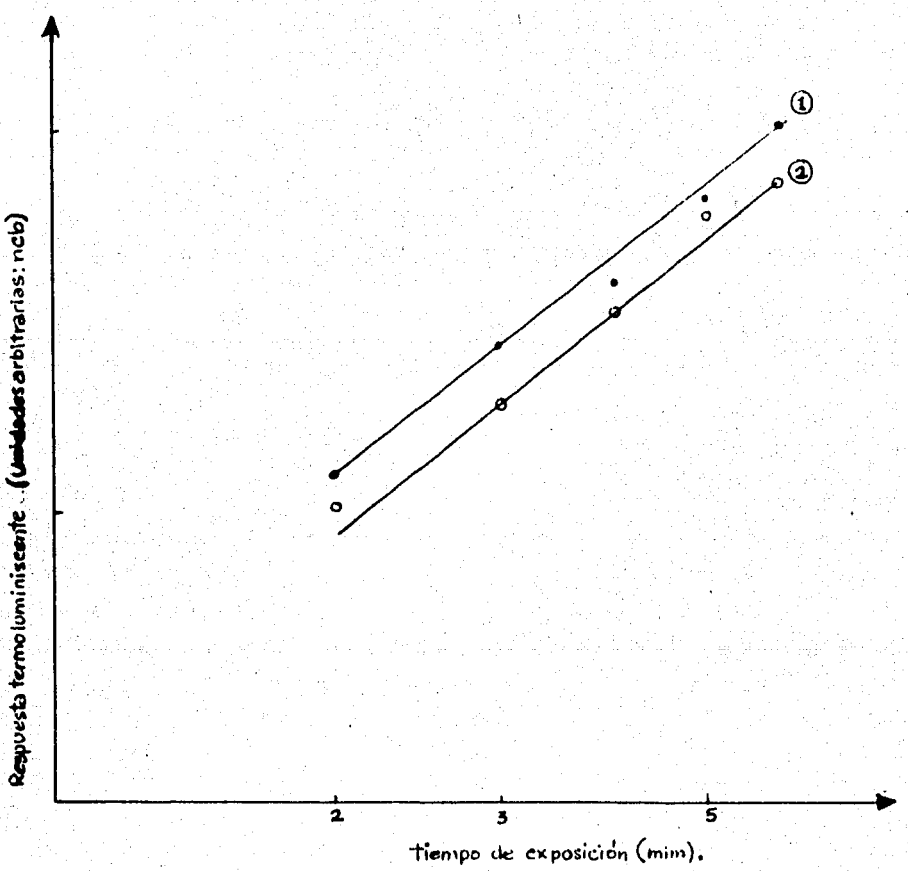


FIGURA 35.

Respuesta termoluminiscente total (picos en 90, 140 y 240°C) contra tiempo de exposición para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn. (0.34%), MP VIII b. Peso de las muestras: 9.010.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (220 KV, 15 mA). Las curvas fueron leídas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- 8 horas.

2.- 25 horas.

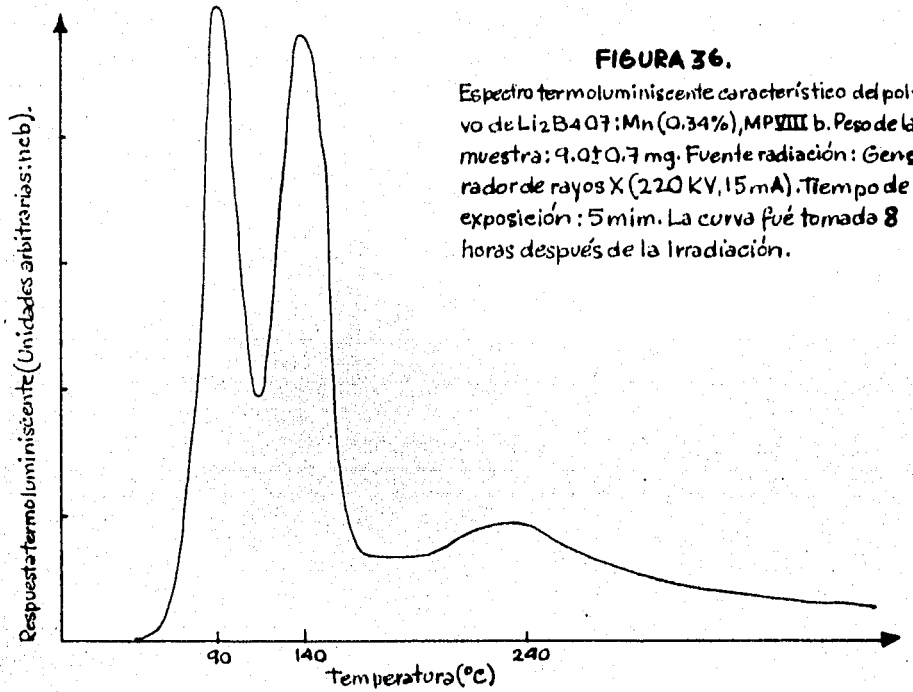


FIGURA 36.

Espectro termoluminiscente característico del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn (0.34%), MP VIII b. Peso de la muestra: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente radiación: Generador de rayos X (220 KV, 15 mA). Tiempo de exposición: 5 mim. La curva fué tomada 8 horas después de la Irradiación.

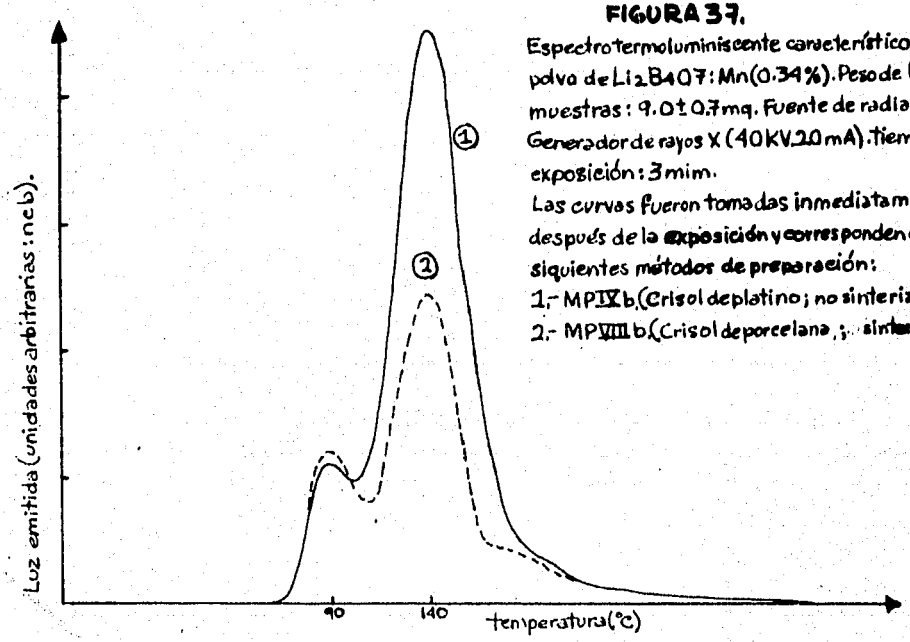


FIGURA 37.

Espectro termoluminiscente característico del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn (0.34%). Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 3 mim.

Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de la exposición y corresponden a los siquientes métodos de preparación:

1.- MP IX b (Crisol de platino; no sinterizado).

2.- MP VIII b (Crisol de porcelana; sinterizado).

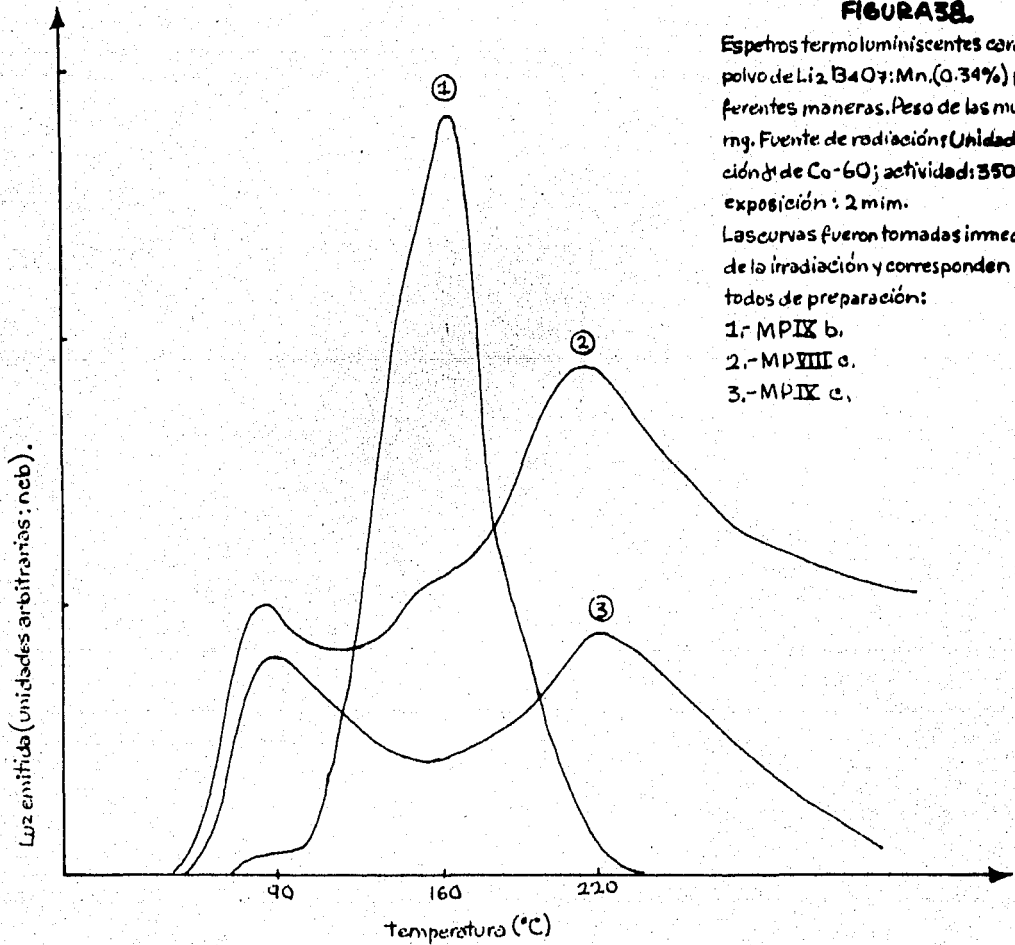


FIGURA 38.

Espectros termoluminiscentes característicos del polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn,(0.34%) procesado de diferentes maneras. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci). Tiempo de exposición : 2 mim.

Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de la irradiación y corresponden a los siguientes métodos de preparación:

1.- MP IX b.
2.- MP VIII c.
3.- MP IX c.

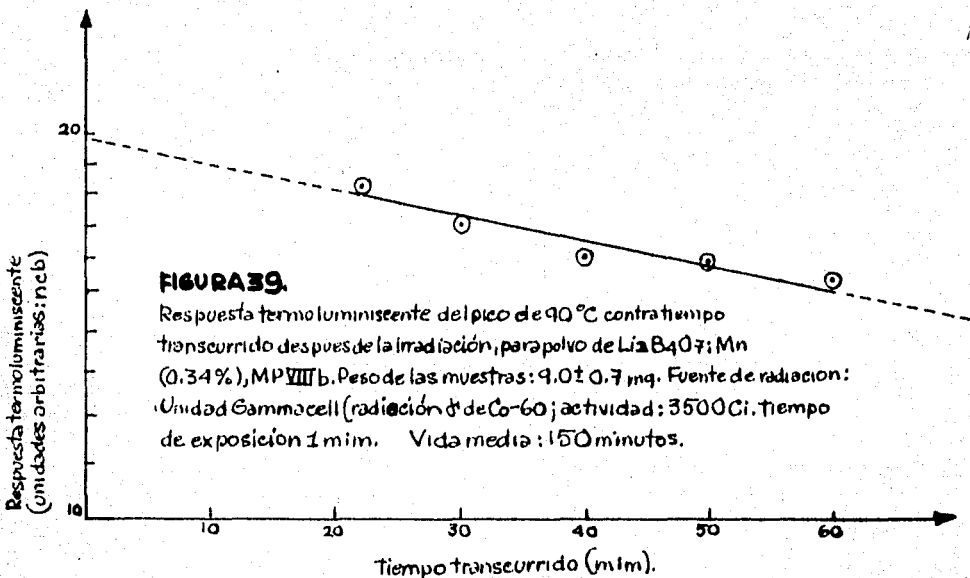


FIGURA 39.
Respuesta termoluminiscente del pico de 90 °C contra tiempo transcurrido despues de la irradiación, para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn (0.34%), MP VIII b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiacion: Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci. Tiempo de exposicion 1 m i m. Vida media: 150 minutos.

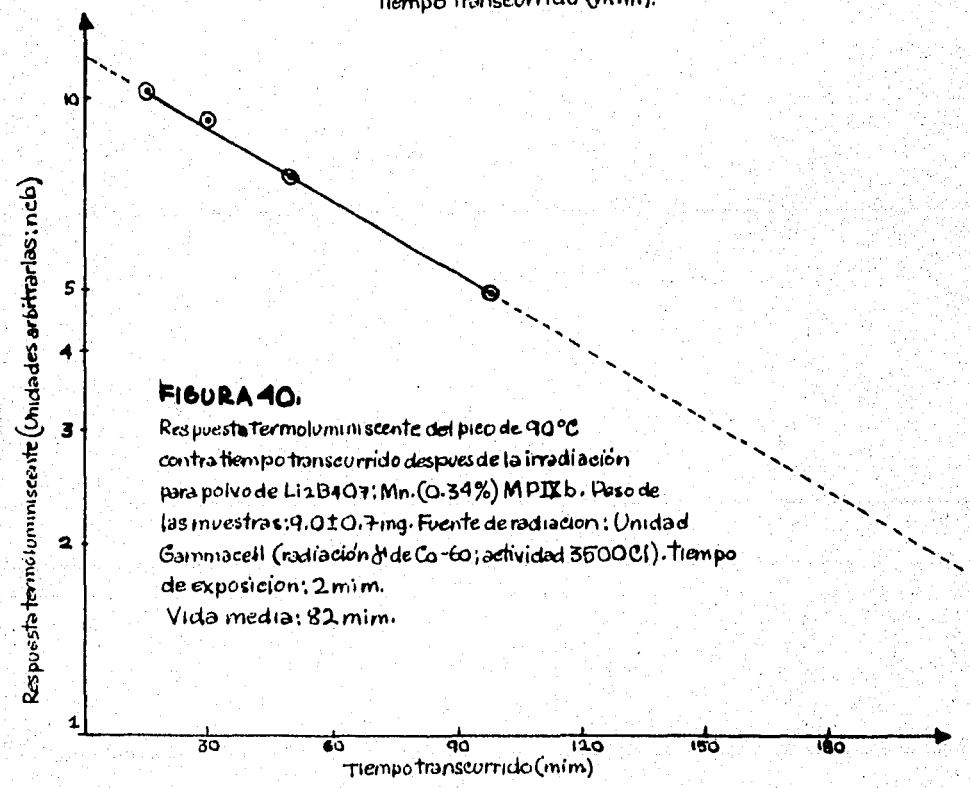


FIGURA 40.
Respuesta Termoluminiscente del pico de 90 °C contra tiempo transcurrido despues de la irradiación para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn. (0.34%) MP IX b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiacion: Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; actividad 3500 Ci). Tiempo de exposicion: 2 m i m.
Vida media: 82 m i m.

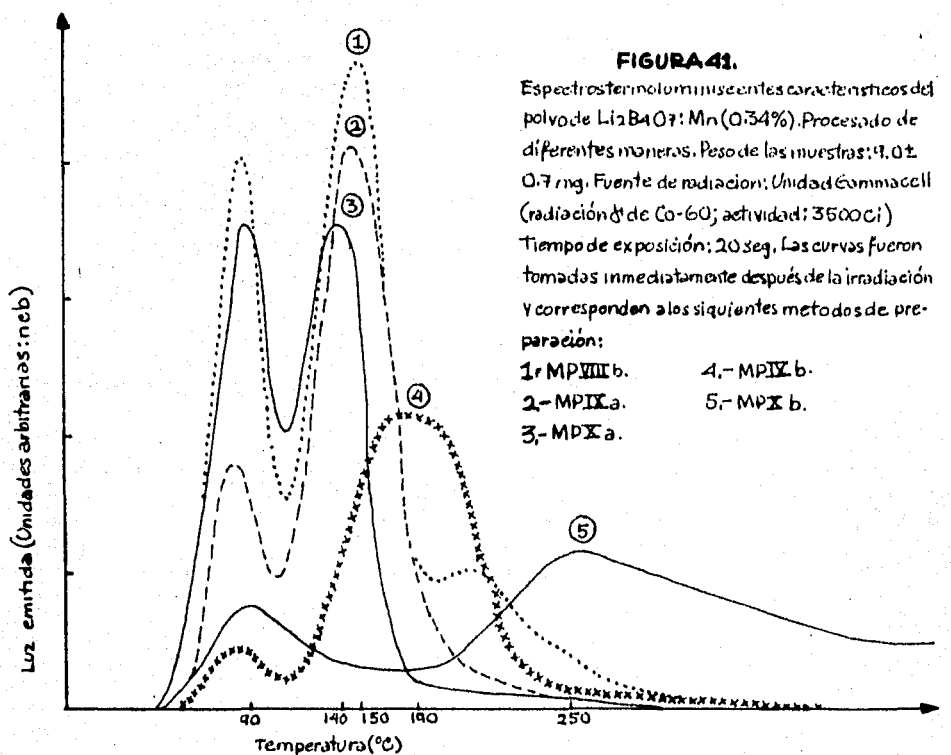


FIGURA 41.

Espectros termoluminiscentes característicos del polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%). Procesado de diferentes maneras. Peso de las muestras: 4.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci) Tiempo de exposición: 20 seg. Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de la irradiación y corresponden a los siguientes metodos de preparación:

1.- MP VIII b.
2.- MP IX a.
3.- MP X a.
4.- MP IX b.
5.- MP X b.

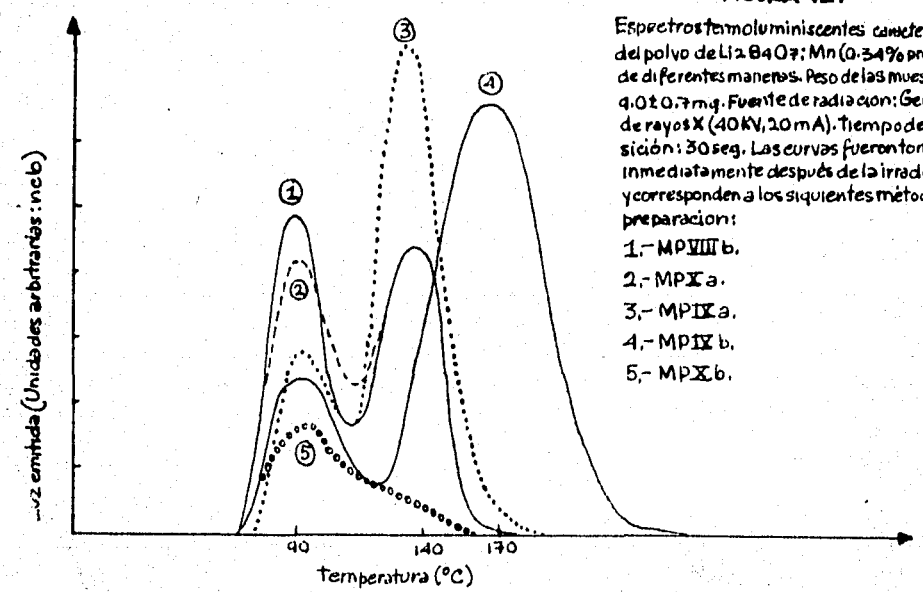


FIGURA 42.

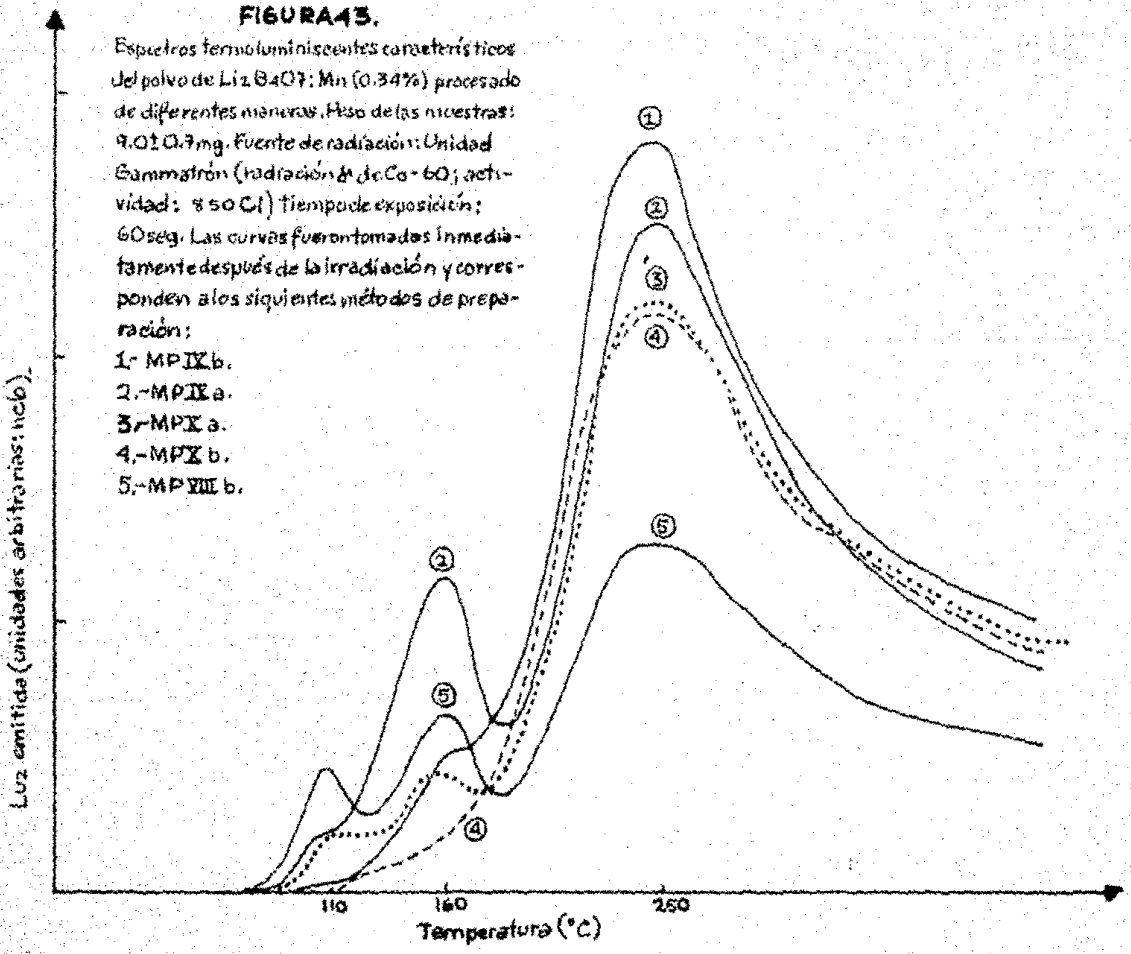
Espectros termoluminiscentes característicos del polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34% procesado de diferentes maneras. Peso de las muestras: 4.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 30 seg. Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de la irradiación y corresponden a los siguientes métodos de preparación:

1.- MP VIII b.
2.- MP X a.
3.- MP IX a.
4.- MP IX b.
5.- MP X b.

FIGURA 43.

Espectros termoluminiscentes característicos del polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%) procesado de diferentes maneras. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gammatrón (radiación γ de Co-60; actividad: 850 Ci) Tiempo de exposición: 60 seg. Las curvas fueron tomadas inmediatamente después de la irradiación y corresponden a los siguientes métodos de preparación:

1.- MP IX b.
2.- MP IX a.
3.- MP X a.
4.- MP X b.
5.- MP VIII b.



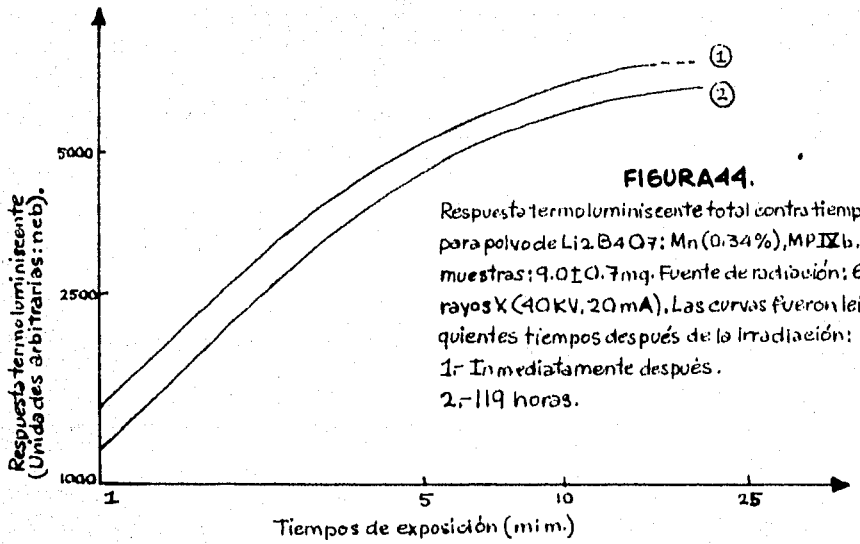


FIGURA 44.

Respuesta termoluminiscente total contra tiempo de exposición para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%), MP IX b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Las curvas fueron leídas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- Inmediatamente después.

2.- 119 horas.

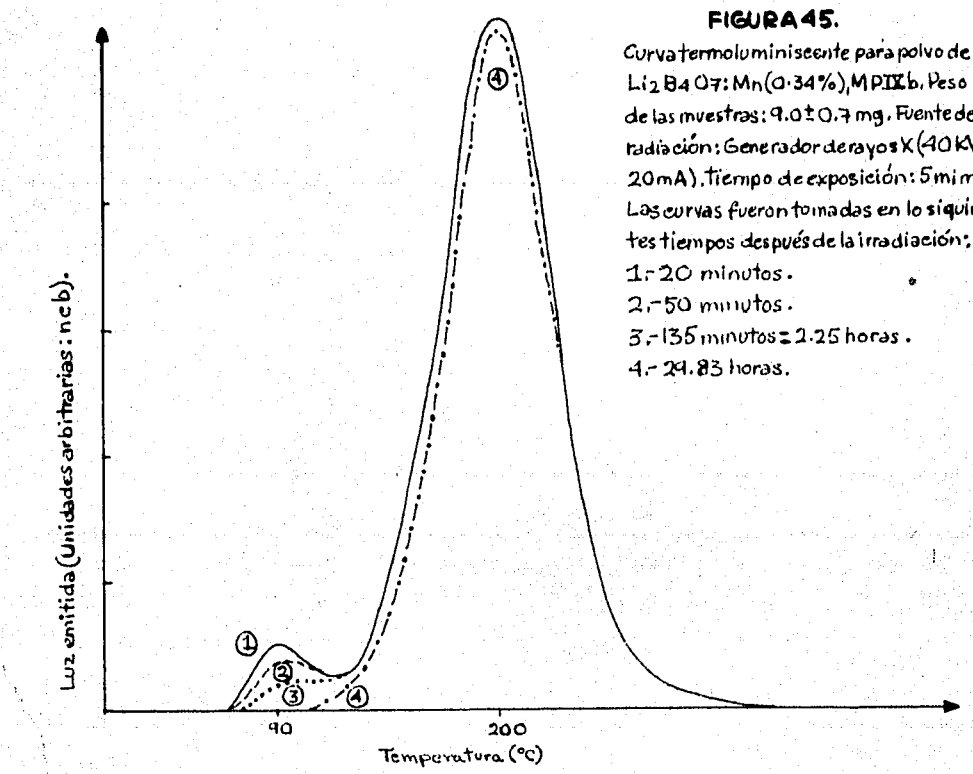


FIGURA 45.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%), MP IX b. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposición: 5 mi m. Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- 20 minutos.

2.- 50 minutos.

3.- 135 minutos = 2.25 horas.

4.- 29.83 horas.

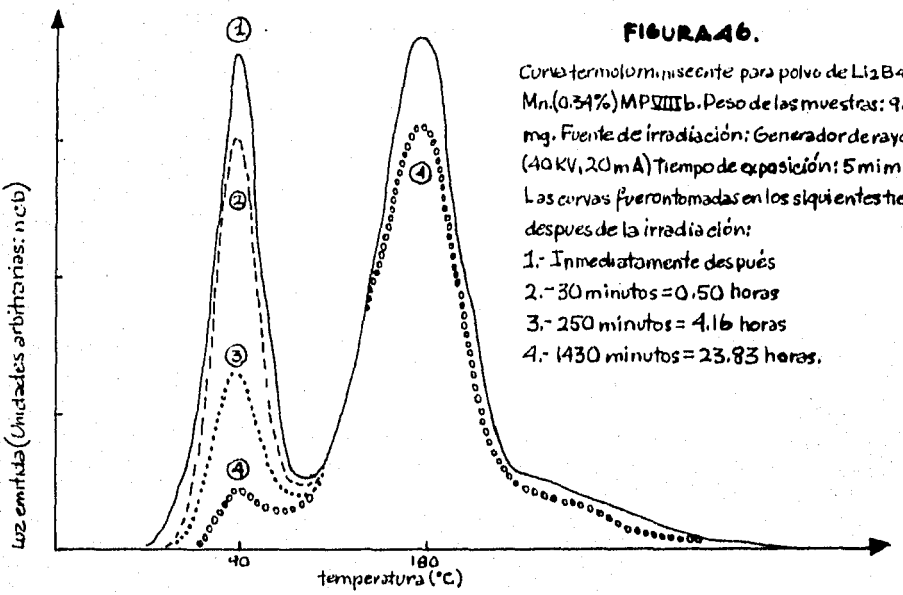


FIGURA 46.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%) MP VIIIb. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de irradiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA) Tiempo de exposición: 5 mim.
Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos despues de la irradiación:
1.- Inmediatamente después
2.- 30 minutos = 0.50 horas
3.- 250 minutos = 4.16 horas
4.- 1430 minutos = 23.83 horas.

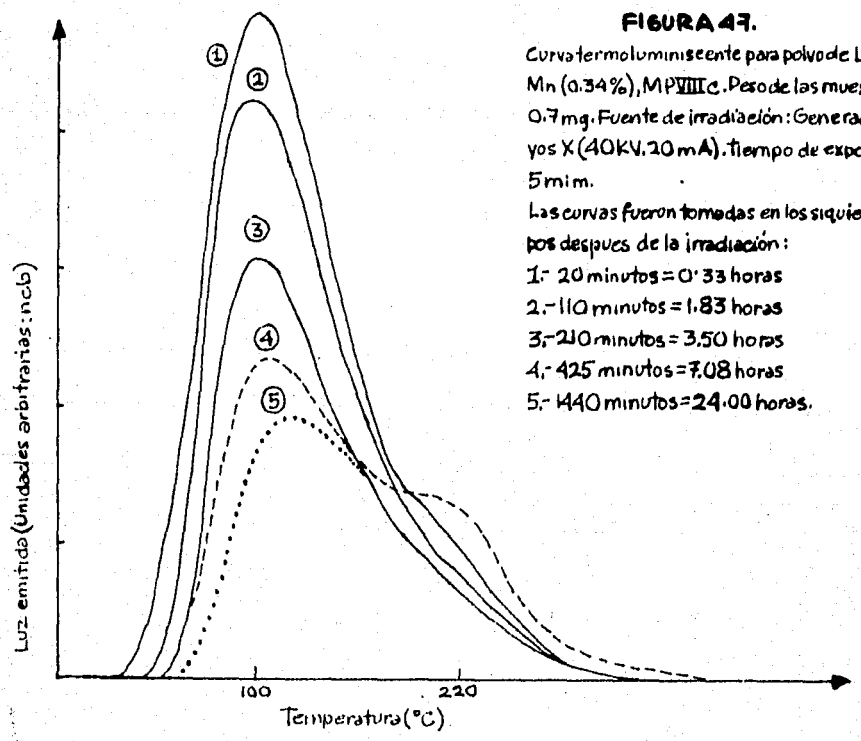


FIGURA 47.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%), MP VIIIc. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de irradiación: Generador de rayos X (40 KV, 20 mA). Tiempo de exposicion: 5 mim.
Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos despues de la irradiación:
1.- 20 minutos = 0.33 horas
2.- 110 minutos = 1.83 horas
3.- 210 minutos = 3.50 horas
4.- 425 minutos = 7.08 horas
5.- 1440 minutos = 24.00 horas.

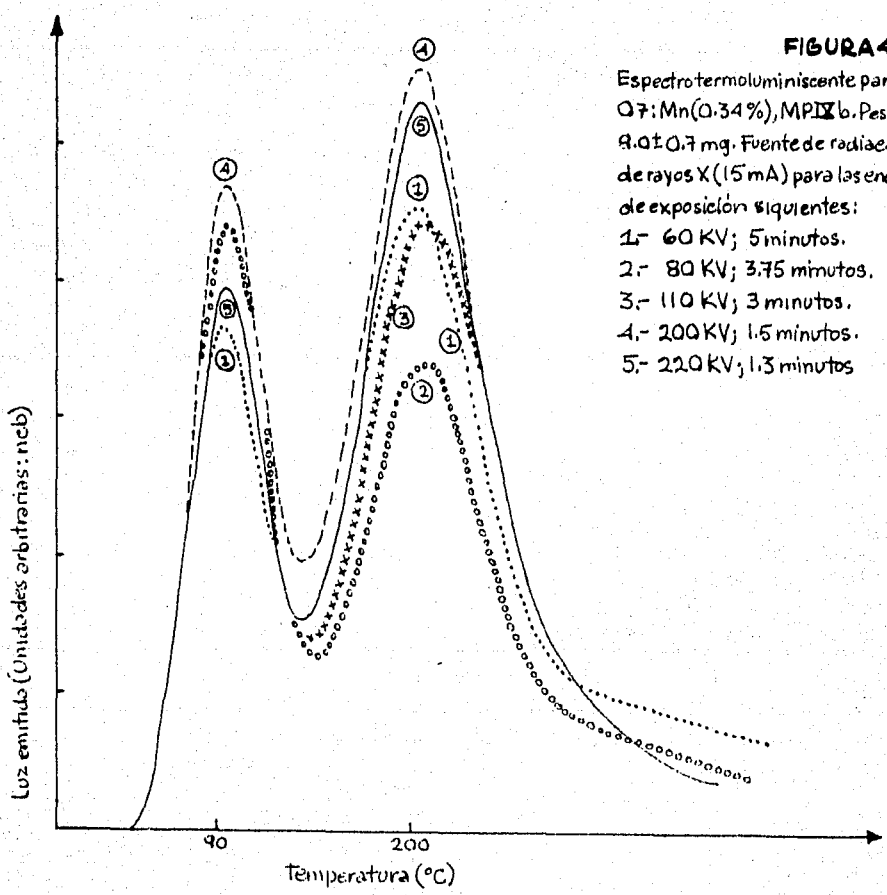


FIGURA 48.

Espectro termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn(0.34%), MPIXb. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Generador de rayos X (15 mA) para las energías y tiempos de exposición siguientes:

1.- 60 KV; 5 minutos.
2.- 80 KV; 3.75 minutos.
3.- 110 KV; 3 minutos.
4.- 200 KV; 1.5 minutos.
5.- 220 KV; 1.3 minutos

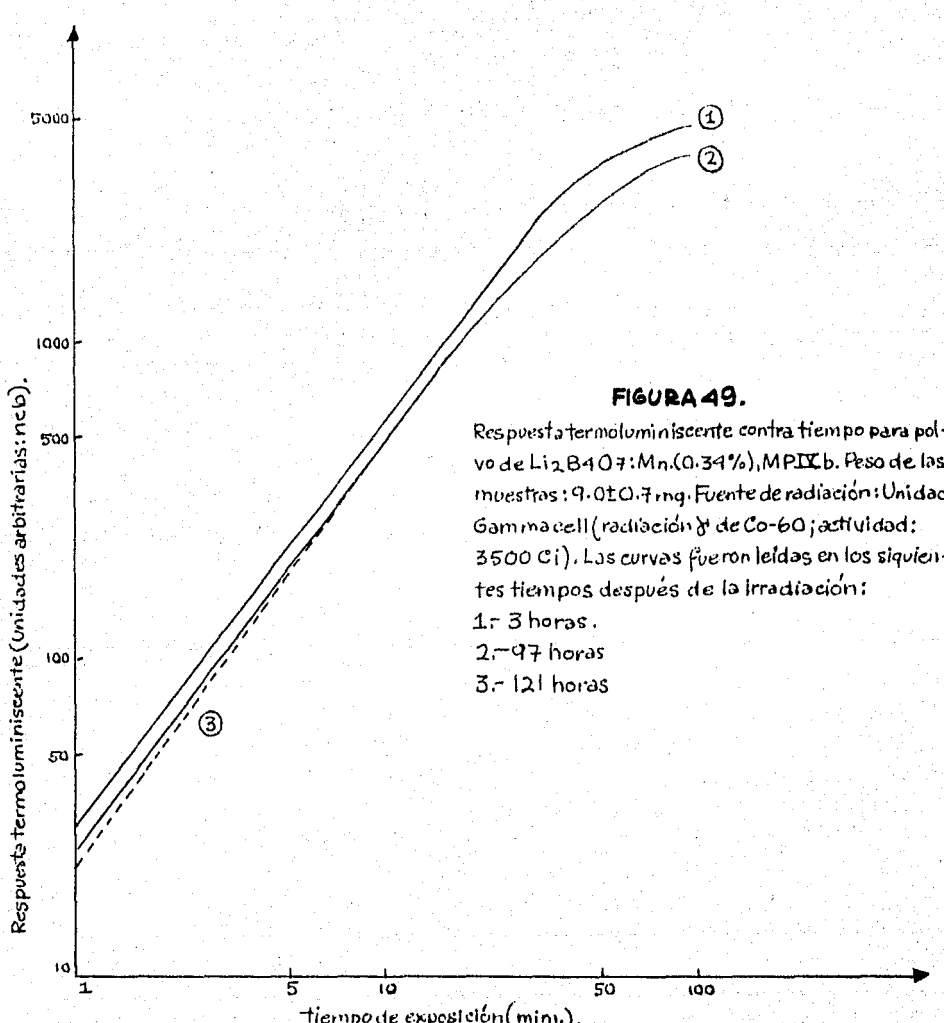


FIGURA 49.

Respuesta termoluminiscente contra tiempo para polvo de $Li_2B_4O_7$:Mn.(0.34%), MP IX b. Peso de las muestras: 9.0±0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gamma cell (radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci). Las curvas fueron leídas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- 3 horas.
2.- 97 horas
3.- 121 horas

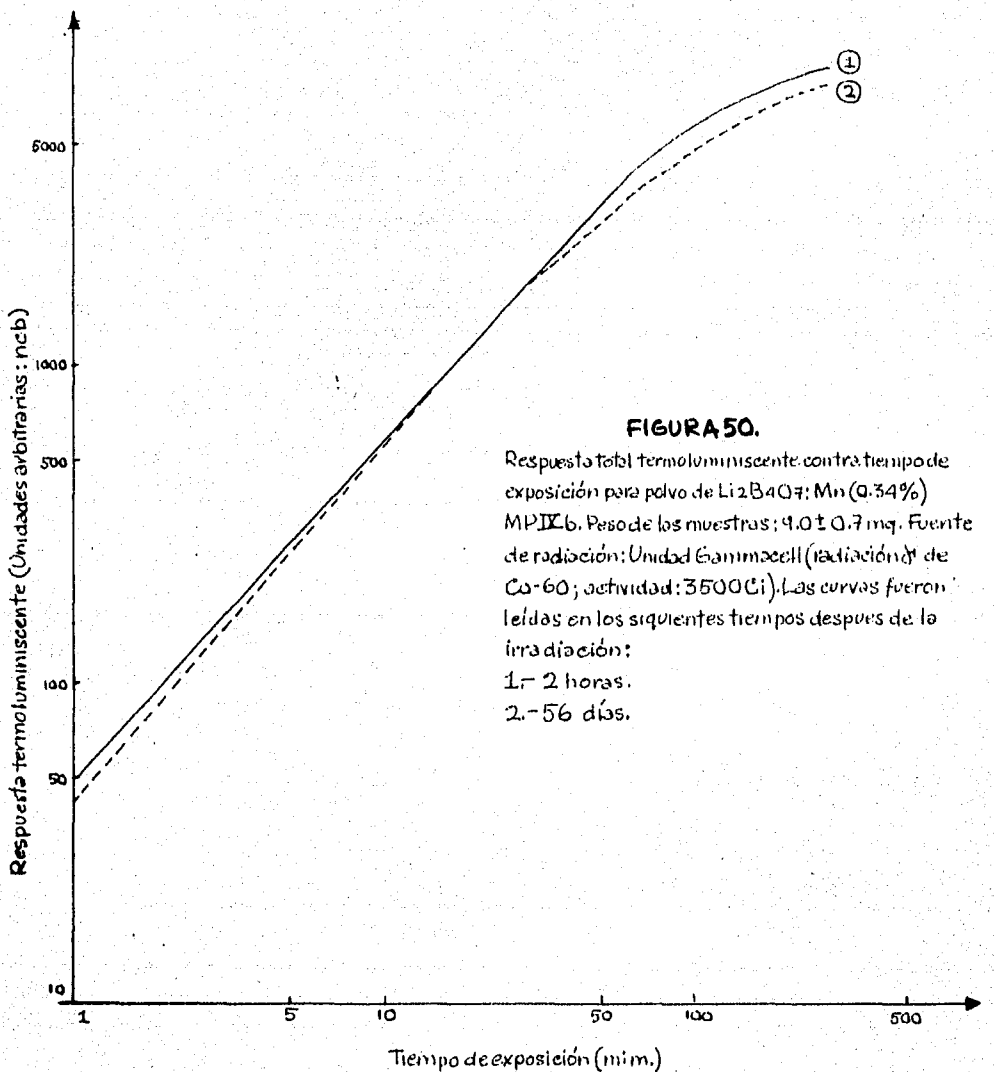


FIGURA 50.

Respuesta total termoluminiscente contra tiempo de exposición para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn (0.34%) MPIC6. Peso de las muestras: 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación: Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; actividad: 3500 Ci). Las curvas fueron leídas en los siguientes tiempos después de la irradiación:

1.- 2 horas.

2.- 56 días.

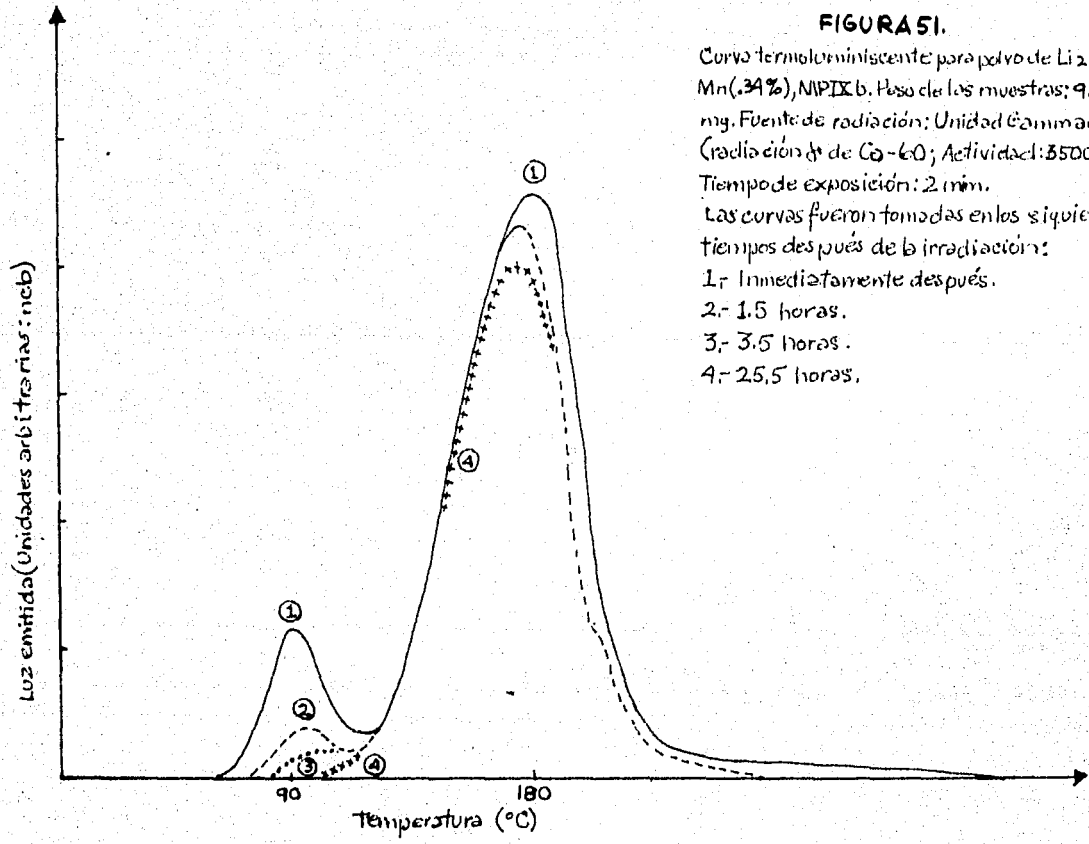


FIGURA 51.

Curva termoluminiscente para polvo de $Li_2B_4O_7$: Mn(.34%), NIPIX b. Peso de las muestras; 9.0 ± 0.7 mg. Fuente de radiación; Unidad Gammacell (radiación γ de Co-60; Actividad: 3500 Ci) Tiempo de exposición: 2 min.
Las curvas fueron tomadas en los siguientes tiempos después de la irradiación:
1.- Inmediatamente después.
2.- 1.5 horas.
3.- 3.5 horas.
4.- 25.5 horas.

APENDICE I

Modelo matemático de Randall y Wilkins.

Como se mencionó en el capítulo primero, la probabilidad de escape para un electrón, está dada por

$$p = s\, e^{-E/kT} \qquad .....(1)$$

así mismo, la variación en el tiempo del número de electrones n en las trampas, es:

$$\frac{dn}{dt} = - np \qquad .....(2)$$

La ecuación diferencial se plantea a partir de la sustitución de (1) en (2);

$$\frac{dn}{dt} = -ns\, e^{-E/kT} \qquad .....(3)$$

ésto, para el caso supuesto de que ningún electrón sacado de la trampa vuelva a caer en una trampa, sino que se recombine con un agujero.

De la ecuación (3) se obtiene

$$\frac{dn}{n} = - s\, e^{-E/kT} \qquad .....(3a)$$

y como β es la velocidad de calentamiento, o sea $dt = \beta\, dT$, entondes:

$$\int_{n_o}^{n} \frac{dn}{n} = -\int_{T_o}^{T} \frac{s}{\beta}\, e^{-E/kT}\, dT \qquad .....(3b)$$

haciendo la integración, obtenemos:

$$n = n_o e^{-\int_{T_o}^{T} s/\beta\; e^{-E/kT} dT} \qquad .....(4)$$

Por otro lado, habíamos visto que:

$$I = -C\,(dn/dt) \qquad .....(5)$$

que también se puede expresar como:

$$I = - C \cdot n \cdot s \cdot e^{-E/kT} \qquad .....(6)$$

Tomando C = 1, y sustituyendo (4) en (6), obtenemos la expresión para la intensidad luminiscente:

$$I = n_0 \, e^{-\int_{T_0}^{T} s/\beta \; e^{-E/kT} dT} . s \; e^{-E/kT} \qquad .....(7)$$

Sin embargo, para graficar la intensidad de luminiscencia contra la profundidad de las trampas, esta última expresión debe ser transformada de la manera siguiente:

Sea: $$u = \frac{E}{kT} \qquad .....(7a)$$

entonces T = E/ku que nos conduce al siguiente valor para dT:

$$dT = - \frac{kT^2}{E} \, du = - \frac{k}{E} \left(\frac{E^2}{k^2 u^2} \right) du$$

finalmente, reduciendo la última expresión tenemos:

$$dT = - \frac{E}{ku^2} \, du \qquad .....(7b)$$

Sustituyendo (7a) y (7b) en (7) tenemos:

$$I = n_0 \; s \; \exp\left\{ - u + \frac{sE}{\beta k} \int_{u_0}^{u} e^{-u} \, u^{-2} \, du \right\} \qquad .....(7c)$$

Haciendo la integración:

$$\int_{u_0}^{u} e^{-u} \, u^{-2} \, du = \int_{u_0}^{\infty} e^{-u} \, u^{-2} \, du - \int_{u}^{\infty} e^{-u} \, u^{-2} \, du$$

pero

$$\int_{u_0}^{\infty} e^{-u} \, u^{-2} \, du = - \, u^{-1} \, e^{-u} \Big]_{u_0}^{\infty} - \int_{u_0}^{\infty} e^{-u} \, u^{-1} \, du =$$

$$= u_0^{-1} \, e^{-u_0} - E_1(u_0) - \int_{u}^{\infty} e^{-u} \, u^{-2} \, du =$$

$$= - \left\{ - \, u^{-1} e^{-u} \Big]_{u}^{\infty} - \int_{u}^{\infty} e^{-u} \, u^{-1} \, du \right\} = - \, u^{-1} \, e^{-u} + E_1(u)$$

entonces: $$I = n_0 \; s \; \exp\left\{ - u + \frac{sE}{\beta k} \left[u_0^{-1} e^{-u_0} - E_1(u_0) - u^{-1} e^{-u} + E_1(u) \right] \right\} \qquad (7d)$$

y recordando que: $x \, e^{x} \, E_1(x) = 1 - \frac{1}{x} + \frac{2}{x^2} + \ldots$

o sea: $E_1(x) \simeq \frac{e^{-x}}{x}\left(1 - \frac{1}{x} + \frac{2}{x^2}\right)$ .....(7e)

Por otro lado, si llamamos:

$u = E/kT \quad ; \quad \alpha = sE/\beta k \quad ; \quad A = \exp\left\{\alpha\left[\frac{e^{-u_o}}{u} - E_1(u_o)\right]\right\}$ .....(8a)

entonces, si sustituímos (7e) y (8a) en la expresión (7d), tendremos:

$$I \simeq n_o\, s\, A \exp\left\{- u - \alpha\frac{e^{-u}}{u} + \alpha\frac{e^{-u}}{u}\left(1 - \frac{1}{u} + \frac{2}{u^2}\right)\right\}$$

$$I \simeq n_o\, s\, A \exp\left\{- u - \alpha\frac{e^{-u}}{u} + \alpha\frac{e^{-u}}{u} - \alpha\frac{e^{-u}}{u^2} + 2\alpha\frac{e^{-u}}{u^3}\right\}$$

Esta última relación, nos conduce a la expresión final:

$$I \simeq n_o\, s\, A \exp\left\{- u - \alpha\frac{e^{-u}}{u}\left(\frac{1}{u} - \frac{2}{u^2}\right)\right\}$$ .....(8)

La expresión final (8), es graficada en la figura VI[16].

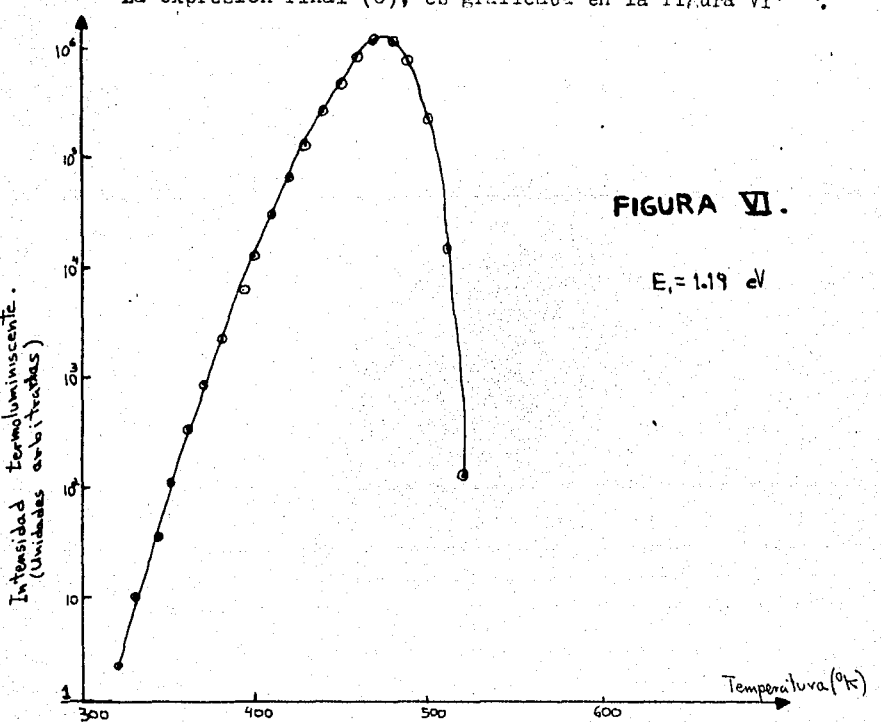


FIGURA VI.

$E_1 = 1.19$ eV

APENDICE II

Modelo matemático de Cameron y Zimmerman.

Con la notación mencionada en la página 9 del primer capítulo, se había visto que la variación de N respecto a R es:

$$\frac{dN}{dR} = \alpha(N_f - N) \qquad .....(1)$$

de donde se obtiene: $\frac{dN}{N_f - N} = \alpha\, dR$

que integrando desde N_o hasta N, y de R=0 a R, se obtiene:

$$-\log (N_f - N)\Big]_{N_o}^{N} = -\Big[\log (N_f - N) - \log(N_f - N_o) = \alpha R\Big]_o^R = \alpha R$$

de donde: $-\log \frac{N_f - N}{N_f - N_o} = \alpha R$

y : $$N = N_o\, e^{-\alpha R} + N_f\,(1 - e^{-\alpha R}) \qquad .....(2)$$

Por otro lado, la variación de L respecto a R, es:

$$\frac{dL}{dR} = \beta(N - L) = \beta N - \beta L \qquad .....(3)$$

sustituyendo (2) en (3), tenemos:

$$\frac{dL}{dR} = \beta\Big[N_o\, e^{-\alpha R} + N_f(1 - e^{-\alpha R}) \Big] - \beta L$$

$$\frac{dL}{dR} + \beta L = \beta\Big[N_o\, e^{-\alpha R} + N_f(1 - e^{-\alpha R}) \Big] = f(R)$$

esto es: $$dL + \beta L dR = f(R)\, dR$$

ecuación diferencial que se resulve introduciendo el factor de integración $e^{\beta R}$, ya que $d(Le^{\beta R}) = e^{\beta R}dL + \beta L e^{\beta R}dR = e^{\beta R}(dL + \beta L dR)$

esto es, como: $e^{\beta R}(dL + \beta L dR) = e^{\beta R} f(R) dR$

entonces

$$d(Le^{\beta R}) = e^{\beta R} f(R) dR$$

$$d(Le^{\beta R}) = e^{\beta R}\beta\Big[N_o e^{-\alpha R} + N_f(1 - e^{-\alpha R})\Big] dR$$

que integrando nos dá: $e^{\beta R}L = \frac{1}{\beta - \alpha}\beta N_o e^{(\beta-\alpha)R} + \beta N_f \frac{1}{\beta} e^{\beta R} - \frac{\beta N}{\beta - \alpha}\, e^{(\beta-\alpha)R} + C$

esto es: $$L = -\frac{\beta N_o}{\alpha-\beta} e^{-\alpha R} + N_f + \frac{\beta N_f}{\alpha-\beta} e^{-\alpha R} + C e^{-\beta R} \quad .....(4)$$

Para encontrar el valor de la constante C, aplicamos a la expresión (4) las condiciones iniciales: R = 0 , entonces L = 0; luego:

$$L = 0 = -\frac{\beta N_o}{\alpha-\beta} + \frac{\beta N_f}{\alpha-\beta} + C + N_f$$

por lo tanto: $$C = \frac{\beta N_o}{\alpha-\beta} - N_f - \frac{\beta N}{\alpha-\beta} = \frac{\beta N_o - \beta N_f - N_f(\alpha-\beta)}{\alpha-\beta}$$

o sea: $$C = \frac{\beta N_o - \alpha N_f}{\alpha-\beta}$$

sustituyendo este valor de C en (4), tendremos:

$$L = -\frac{\beta N_o}{\alpha-\beta} e^{-\alpha R} + \frac{N_f(\alpha-\beta)}{\alpha-\beta} + \frac{\beta N_f}{\alpha-\beta} e^{-\alpha R} + e^{-\beta R}\left(\frac{\beta N_o - \alpha N_f}{\alpha-\beta}\right)$$

$$L = -\frac{\beta N}{\alpha-\beta} e^{-\alpha R} + \frac{\beta N_o}{\alpha-\beta} e^{-\beta R} + \frac{N_f}{\alpha-\beta}(\alpha - \alpha e^{-\beta R}) - \beta + \beta e^{-\alpha R})$$

quedando la expresión final de la solución, como sigue:

$$L = \frac{\beta N_o}{\alpha-\beta}(e^{-\beta R} - e^{-\alpha R}) + \frac{N_f}{\alpha-\beta}\left[\alpha(1 - e^{-\beta R}) - \beta(1 - e^{-\alpha R})\right]$$

La gráfica L-R para el LiF, ya fue dada en el capítulo primero en la página 11.

APENDICE III

Análisis cristalográfico con rayos X de algunas muestras usadas en la experimentación.

En el texto (página 30), se mencionó la selección de tres métodos de preparación diferentes, con el objeto de comparar su comportamiento como dosímetros termoluminiscentes.

Para comprobar la información del estado físico de esos tres lotes de borato de litio activado con manganeso procesados de diferentes maneras, se procedió a realizar con ellos un análisis por difracción de rayos X por el método de polvos, mediante el difractómetro.

Este análisis mostró que los materiales preparados con MP VIIIb y con MPIXb, presentan una estructura cristalina, mientras que el diagrama obtenido para la muestra procesada según MPVIIIc, es el correspondiente al de una sustancia amorfa. Las gráficas de difracción de las muestras cristalinas, corresponden al diagrama característico del $Li_2B_4O_7$.

BIBLIOGRAFIA

1.- Curie M.,1904. "Investigación en substancias radiactivas", (en francés) Gauthier-Villars, 105. París, Francia.

2.- Wick, F.G. 1925. "The effect of X rays in producing and modifying thermoluminescence". Phys. Rev. 25;588.

3.- Lyman, T. 1935. "Transparence of the air", Phys. Rev. 48;149.

4.- Daniels, F. 1950. "TL and related properties of crystals". Symp. of Chem. and Phys. of Radiation Dosimetry. Maryland, USA.

5.- West, E.J., y otros,1967. "Thermoliminescent dosimeters of lithium borate". Progr.Rep. June 1967, NRL.

6.- Shuttlewoth, E. and Jayachandran, C.A.,1967. "Lithium botate TLD material". Phys. Med. Biol. 12,266 (abstract).

7.- "The dosimetric properties of thermoluminescence of lithium borate with a manganese activator". Dep. of Rad., Univ. of Wisconsin.

8.- Cameron, J.R., Suntharalingam, N. and Kennet, G.N.,"Thermolumines cent dosimetry". The Univ. of Wisconsin Press, 1968;57.

9.- Leverenz,H.W.,1949. Science Rev., 109;183.

10.- "Enciclopedia Salvat de la ciencia y de la tecnología".

11.- Randall, J.T. and Wilkins, M.H. Proc. Royal Soc. of London;184.

12.- Kirk, R.D., Schulman, E.J., West, E.J. and Nash, A.E. "Studies on thermoluminescente lithium borate for dosimetry". IAEA, Vienna 1967 (Proc.).

13.- Maza del Torno, V.M. "El fluoruro de calcio natural como dosíme - tro termoluminiscente de radiación". Tesis profesional. 1969.

14.- Falicov, L.M. "La estructura electrónica de los sólidos". OEA, se rie de Física, Monografía No. 3.

15.- Francois,H., Gupton,E.D.,Maushart,R. and Piesch,E. "Personnel dosimetry systems for external radiation exposures". Vienna 1970, Tech. Rep. 109.

16.- Tovar Muñoz, V.M. "Dosimetría termoluminiscente aplicada a proble mas en radioterapia". Tesis profesional. 1969.