

209.  
25

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE CIENCIAS



**“ESTUDIO DEL  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$  COMO DOSIMETRO  
TERMOLUMINISCENTE DE RAYOS X”.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**F I S I C O**  
**P R E S E N T A**  
**PANTALEON GOMEZ CARRANZA**



## **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 está 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.

# I N D I C E

## CAPITULO I .- ANTECEDENTES

I. 1	El problema de la dosimetría. . . . .	2
I. 2	Unidades de radiactividad utilizadas en dosimetría. . . . .	4
I. 3	Técnicas de dosimetría. . . . .	11
I. 4	Termoluminiscencia. . . . .	15
I. 5	Modelos y teorías sobre la Termoluminiscencia. . . . .	18
I. 6	Antecedentes de empleo de la TL en dosimetría. . . . .	32
I. 7	Características ideales de un buen material DTL. . . . .	34
I. 8	Algunos materiales usados en DTL. . . . .	36
I. 9	Termoluminiscencia del $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$ . . . . .	39

## CAPITULO II.- EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

II. 1	Calibración, Envejecimiento, Desvanecimiento. . . . .	44
II. 2	Características Generales	
II. 2 a)	Calibración. . . . .	49
II. 2 b)	Desvanecimiento. . . . .	53
II. 2 c)	Envejecimiento. . . . .	55

## CAPITULO III.- ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

III. 1	Análisis de resultados. . . . .	58
III. 2	Conclusiones. . . . .	64
	Gráficas. . . . .	68
	Referencias. . . . .	78

## RESUMEN

Este es un trabajo de caracter experimental que tuvo como objeto estudiar el material  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$  monocristalino como - - dosímetro termoluminiscente.

Para ello fueron irradiadas con rayos X y a temperatura ambiente muestras de  $\text{NaCl}$  con dos concentraciones diferentes de - - manganeso, 6.2 y 86.9 partes por millón (ppm.).

El estudio se dividió en tres partes diferentes denominadas:

i) calibración: ii) desvanecimiento: y iii) envejecimiento, se emplearon como variables independientes las siguientes:

i) Exposición (tiempo que irradiaba a la muestra para una razón de exposición fija).

ii) tiempo transcurrido entre la irradiación y la lectura,

iii) tiempo transcurrido entre el templado de la muestra y su irradiación, respectivamente.

Al analizar los resultados se encontró:

1) Un intervalo de linealidad pequeño comparado con el de - - otros fósforos.

2) El pico denominado tres resultó ser el mas confiable y de - mejor comportamiento en cuanto a estabilidad.

3) La señal se detecta facilmente.

4) La señal es estable.

5) El material es fácil de proteger contra los factores ambientales.

7) Es recomendable usar el  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$  como dosímetro termoluminiscente siguiendo las reglas: templarse, envejecerse por - doce dias y desvanecerse también doce dias para obtener una estabilidad óptima.

## PRESENTACION

La tesis consta de tres capítulos denominados:

I. Antecedentes,

II. Experimentos y Resultados,

III. Análisis de resultados y conclusiones.

En el capítulo I se parte de lo más general y se intenta llegar a lo más particular de la siguiente manera: se proporciona al inicio las características y problemas de la dosimetría, se hace énfasis en las unidades de radiación que se utilizaron no hace mucho tiempo pero también se proporciona una tabla sobre las unidades que rigen actualmente, se prosigue mencionando algunas de las técnicas empleadas en dosimetría (en este punto cabe aclarar que la técnica de termoluminiscencia se trata separadamente para hacer notar que es la más importante en este trabajo) tales como detectores electrónicos, películas fotográficas etc; se proporciona una lista de materiales empleados en dosimetría termoluminiscente. (DTL) junto con sus características.

Finalmente se resumen algunos resultados sobre estudios de la termoluminiscencia (TL) del  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$ .

En el capítulo II se hace una descripción detallada de los experimentos fundamentales realizados: II.i) Calibración, II.ii) Desvanecimiento, II.iii) Envejecimiento. Se describe el equipo utilizado y se termina presentándose los resultados obtenidos.

En el capítulo III se desarrolla un análisis de los resultados, se enlistan las conclusiones y finalmente se sugieren algunos experimentos que proporcionarían mayor información sobre el tema.

Es necesario aclarar que en la presente tesis no -  
se intenta proporcionar una explicación sobre los fenómenos -  
de la TL y de la dosimetría, sin embargo se proporcionan algunos  
datos acerca de ellas con el objeto de tener un panorama-  
general sobre el problema de la dosimetría termoluminiscente.

C A P I T U L O I .  
A N T E C E D E N T E S .

## I .1 EL PROBLEMA DE LA DOSIMETRIA

La dosimetría tiene como objeto la medición de la energía cedida a la materia por las radiaciones ionizantes que la atraviesan.

Cuando la radiación ionizante atraviesa a la materia, altera a la estructura de esta ocasionando defectos que pueden ser - electrónicos, iónicos o de gran extensión, la detección directa o indirecta de estos defectos es lo que permite desarrollar a dosimetría.

Los cambios dependen tanto de la naturaleza del material empleado como dosímetro, como del tipo y cantidad de radiación a la que ha sido expuesto.

Por otra parte, la dosimetría encuentra su aplicación más importante en la dosimetría personal. Desde hace más de 50 años (5) se sabe que las radiaciones ionizantes dañan los tejidos del cuerpo humano y son peligrosas por un gran número de razones: no poseemos órganos sensoriales que nos indiquen cuando estamos siendo irradiados, el daño puede originarse desde fuera y desde dentro del cuerpo humano y los efectos no aparecen inmediatamente sino después de un periodo relativamente largo, por tanto no sentimos algo al recibir una cantidad de radiación ionizante (o dosis) de una fuente radiactiva.

Es por esto que las sustancias radiactivas son potencialmente más peligrosas que los venenos normales, y por tanto se necesitan medidas estrictas de control.

Es bastante complicado establecer una relación entre la dosis y el daño en seres humanos.

La mayor parte de la información procede de pacientes que recibieron grandes cantidades de rayos X con fines terapéuticos, de trabajadores de la industria luminiscente, de trabajadores de la industria de la energía atómica que estuvieron expuestos a grandes cantidades de radiación etc.

En relación a los problemas antes mencionados, los primeros valores de dosis máximas permisibles fueron fijadas por varias agrupaciones (tales como la International Comite on Protection Radiation (I.C.P.R.) etc.) en el año de 1934<sup>(1)</sup>, con el objeto de prevenir los efectos de la radiación.

La I.C.P.R. ha establecido sus recomendaciones para dosis máximas permisibles de acuerdo con la información disponible<sup>(2)</sup>. Se sabe por ejemplo que el daño es proporcional a la dosis acumulada, que no existe dosis umbral en relación a la dosis daño etc., también se sabe que la posibilidad de daño por radiación varía con el tejido expuesto, con la capacidad de las células para reproducirse etc. Es por esto que algunos de los órganos críticos del cuerpo humano son las gónadas, la médula ósea roja y los cristalinos. A continuación se da una lista sobre las dosis anuales máximas permisibles<sup>(1)</sup>.

ORGANO	I	DOSIS MAXIMAS PERMISIBLES
Gónadas, Médula ósea roja		5 rems/año
Cuerpo total		
Piel, Tiroides, Hueso		30 rems/año
Manos, Antebrazos, Tobillos y Pies		75 rems/año
Otros Organos.		15 rems/año

## 1.2 UNIDADES DE RADIATIVIDAD UTILIZADAS EN DOSIMETRIA

De la misma forma que otras magnitudes físicas, la intensidad de las radiaciones ionizantes se miden por medio de sus propiedades. Los efectos más comunmente usados para medirles son:

La ionización, la fluorescencia y el enegrecimiento de una película fotográfica.

El organismo encargado de proponer las cantidades de radiación así como sus unidades es la comisión internacional de unidades y medidas de radiación ( C.I.U.M.R. ). En el año de 1962 la C.I.U.M.R. definió las siguientes unidades de radiación.

Exposición se mide en roentgens; un roentgen es la cantidad de radiación X ó  $\gamma$  tal que la emisión corpuscular en 0.001293 gr. de aire le produce una unidad electrostática de carga de ambos signos.

La definición anterior, válida para rayos X y rayos  $\gamma$ , no da una indicación de la energía absorbida por los materiales que no sean aire.

La exposición proporciona una medida de la energía que la radiación ha impartido sobre la unidad de volumen de un cierto material. Es obvio que un roentgen impartirá distinta energía a materiales diferentes (con el mismo volumen). En la práctica se usan generalmente unidades fraccionarias del roentgen.

Dosis Absorbida tiene como unidad al RAD (radiation absorbed dose). Un rad se define como la cantidad de radiación

ionizante que produce una absorción de energía de 100 erg. - por cada gramo de material, y se aplica a todo tipo de materiales.

Sobre la base de las anteriores unidades de radiación, - se forman las unidades de razón de dosis tales como: El rad - por segundo, y de razón de exposición como el roentgen por - segundo, etc.

Como se mencionó antes, un roentgen imparte distinta cantidad de energía a un gramo de aire y a un gramo de tejido, pero - en el tejido blando el rad y el roentgen son aproximadamente iguales y para muchos fines son intercambiables (2).

Equivalente físico de la exposición. Nos indica qué ioniza - ción produce un roentgen en cierto material. La medición de - la exposición por su capacidad ionizante permite establecer - el quivalente físico de la unidad de exposición, para el - - aire se ha calculado que un roentgen es equivalente a 85 - erg/g. (3).

La unidad del equivalente físico de la radiación es el - REP.

Equivalente De Dosis. Es la cantidad de energía necesaria - para producir en 1/100 de g de material el mismo daño que - una radiación de referencia.

La valoración de la radiación por su acción biológica - originó el equivalente biológico del roentgen. La unidad em - pleada se denomina REM. (Radiation equivalent men).

Las cantidades de radiación anteriores están relaciona - das entre sí, por lo general, si se conoce una de ellas es - posible determinar las otras dos, aunque para esto es neces - ario información complementaria como por ejemplo: tipo y - -



dando nombres especiales a estas (5). La tabla 1 muestra la relación entre estas unidades.

T A B L A 1

UNIDADES ACTUALES UTILIZADAS EN DOSIMETRIA

CANTIDAD	DEFINICION ACTUAL	UNIDAD SI	EQUIVALENCIA
Actividad (A)	La actividad de un de terminado radionúclido en un estado particular de energía y en un momento dado es el cociente de $dN$ entre $dt$ ; donde $dN$ es el valor esperado del número de transiciones nucleares espontáneas - desde ese estado de energía, que ocurren en el intervalo de tiempo $dt$ .	becquerel (Bq)	1 Bq = $2.7077 \times 10^{-11}$ Ci 1 Ci = $3.7 \times 10^{10}$ Bq
Exposición (X)	Es el cociente de $dQ$ entre $dm$ ; donde $dQ$ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos los iones, - positivos y negativos liberados por fotones en una masa de aire - son frenados completamente.	coulomb por Kilo gramo. (C/Kg)	1 C/Kg = 3876 R 1 R = $2.58 \times 10^{-4}$ C/Kg.
Rapidez de - Exposición (X)	Es el cociente de $dX$ entre $dt$ ; donde $dX$ - es el incremento de exposición en el intervalo de tiempo $dt$ .	coulomb por Kilo gramo - segundo. C/Kg.s	1 C/Kg.s = 3876 R/s 1 R/s = $2.58 \times 10^{-4}$ C/Kg.s
Dosis absorbida (D)	Es el cociente de $dE$ entre $dm$ ; donde $dE$ es la energía promedio - depositada por la - radiación ionizante - en un elemento de materia de masa $dm$ .	gray (Gy)	1 Gy = 100 rad 1 rad = $10^{-2}$ Gy

CANTIDAD	DEFINICION ACTUAL	UNIDAD SI	EQUIVALENCIA
Rapidez de - dosis absor- bida (D)	Es el cociente de $dD$ entre $dt$ ; donde $dD$ - es el incremento de- la dosis absorbida - en el intervalo de - tiempo $dt$ .	gray por segundo. (Gy/s)	1 Gy/s=100 rad/s 1 rad/s= $10^{-2}$ Gy/s
Energía espe- cífica impar- tida (Z)	Es el cociente de $\epsilon$ - entre $m$ ; donde $\epsilon$ es - la energía estocásti- ca impartida por la- radiación ionizante- a una porción de ma- teria de masa $m$ .	gray (Gy)	1 Gy=100 rad 1 rad= $10^{-2}$ Gy
Kerma (K)	Es el cociente de $d\epsilon_{tr}$ entre $dm$ ; donde $d\epsilon_{tr}$ es la suma de todas las energías cinéti- cas iniciales de to- das las partículas ionizadas cargadas, liberadas por partí- culas ionizantes - sin carga en una - porción de materia- de masa $dm$ .	gray (Gy)	1 Gy=100 rad 1 rad= $10^{-2}$ Gy
Rapidez de Kerma (K)	Es el cociente de - $dK$ entre $dt$ ; donde $dk$ es el incremento de Kerma en el in- tervalo $dt$ .	gray por segundo. (Gy/s)	1 Gy/s=100 rad/s 1 rad/s= $10^{-2}$ Gy/s
Equivalente de Dosis(H)	Es el producto de $D$ , $Q$ , $N$ ; donde $D$ es la - dosis absorbida, $Q$ - el factor de calidad y $N$ el producto de - factores modificantes que incluyen el efec- to de la rapidez de- dosis el fraccionami- ento de la misma, etc. Actualmente la CIPR- le ha asignado el va- lor de 1.	sievert (Sv)	1 Sv=100 rem. 1 rem= $10^{-2}$ Sv

CANTIDAD	DEFINICION ACTUAL	UNIDAD SI	EQUIVALENCIA
Rapidez de - equivalente- de dosis (H)	Es el cociente de $dH$ entre $dt$ ; donde $dH$ - es el incremento del equivalente de dosis en el tiempo $dt$ .	Sievert por segun <u>do</u> (Sv/s)	1 S/v=100 rem/s 1 rem/s= $10^{-2}$ Sv/s
Indice de - equivalente de dosis - ( $H_1$ )	El indice de equiva- lente de dosis en un punto es el equivalen te de dosis máx <u>imo</u> en una esfera de 30 cm - de diámet <u>ro</u> , centrada en ese punto de densi dad unitaria.	Sievert por segun <u>do</u> (Sv/s)	1 S/v=100 rem/s 1 rem/s= $10^{-2}$ Sv/s
Indice de - dosis absor <u>bi</u> da ( $D_1$ ).	El índice de dosis ab sorbida en un punto - es la dosis absorbida máxima dentro de una- esfera de 30 cm de -- diámetro centrada en ese punto y de materi al de densidad unita- ria.	Gray (Gy).	1 Gy=100 rad 1 rad= $10^{-2}$ Gy

### I.3 TÉCNICAS DE DOSIMETRIA

Los daños causados por los rayos X y las fuentes radiactivas sobre diversos materiales ( como en el organismo humano. ) originaron un rápido desarrollo de los métodos para detectar y medir la radiación. Todos los métodos usados en la detección de rayos X se basan en algunos aspectos físicos que ocasionan los rayos X en la materia, por ejemplo; la producción de calor, la reducción de la resistencia eléctrica, la emisión de luz, la producción de iones en un gas los efectos fotográficos etc.

A continuación se proporcionan algunos de los métodos empleados en la detección de los rayos X, dándose algunas de las ventajas y desventajas que poseen unos sobre los otros.

**DETECTORES POR IONIZACION.** Se basan en la producción de iones en un gas y en la separación de estos por medio de un campo eléctrico. Podemos decir que el más sencillo de este tipo de detectores es la cámara de ionización.

La cámara de ionización contiene un gas conocido en el cual los iones tienen un largo período de vida, contiene un gran número de electrodos que se encuentran a un voltaje determinado para la recolección de los iones. En este dispositivo la energía depositada por la radiación ionizante es proporcional al número de iones producidos en el gas. La cantidad de carga y velocidad de estos iones son las variables que se miden en una cámara de ionización. La recolección de los iones de gas cargados genera un voltaje que después es amplificado y constituye la señal de salida de la cámara; el circuito

eléctrico puede ser diseñado para un rango bastante grande. Otro tipo de detector electrónico es el contador proporcional, en el se aplica un voltaje comprendido entre 250-800 Volts en los electrodos. Los iones de gas primarios producidos por la radiación incidente son acelerados hasta cierta energía, al colisionar con moléculas neutras de gas producen más iones. La carga total generada en la cámara es mayor que la carga original producida pero proporcional a esta. Estos contadores pueden actuar como filtros, es decir es posible calibrarlos de tal forma que solo produzcan pulsos definidos (de voltaje característicos) para cierto tipo de partículas.

Contador Geiger-Muller. Si la diferencia de potencial es incrementada en el contador proporcional hasta aproximadamente 800-1200 Volts, se encuentra que la proporcionalidad desaparece eventualmente, en esta región de potencial se produce una descarga pues se liberan electrones secundarios de las paredes del tubo debido a efectos laterales originados por la avalancha inicial de iones. Los electrones secundarios provienen del siguiente proceso: cuando un ión positivo del gas del contador se neutraliza en la superficie metálica del cátodo se libera una cantidad considerable de energía que se puede utilizar para expulsar un electrón de la superficie del cátodo. Al moverse hacia el electrodo central estos electrones producen nuevas ionizaciones perpetuando de este modo la descarga. Los contadores GEIGER-MULLER pueden usarse de dos maneras: a) como aparatos electrónicos para contar el No. total de pulsos registrados en un tiempo determinado. b) para medir el ritmo al cual se producen los pulsos, esto se puede hacer por medio de un transductor.

Los dosímetros electrónicos se utilizan solo en situaciones de trabajo en donde es posible alcanzar niveles altos de exposición, puesto que son poco sensibles a partículas con poco poder de ionización, además poseen gran volumen por lo que no pueden ser usados en regiones pequeñas.

Este tipo de detectores funcionan mejor como instrumentos de laboratorio puesto que requieren de "complejos" equipos auxiliares.

Método fotográfico. El ennegrecimiento de una película fotográfica por cualquiera de las radiaciones ionizantes se puede utilizar para detectar la exposición a las mismas. El procedimiento en forma general consiste en sujetar a un conjunto de películas de las mismas características a exposiciones conocidas y con varias energías para obtener curvas de ennegrecimiento contra exposición.

La dosis de la radiación desconocida, a la cual una película es expuesta se puede determinar comparándola con las curvas de ennegrecimiento-exposición. El proceso que experimenta una película al someterla a irradiación se ilustra en la figura (1)

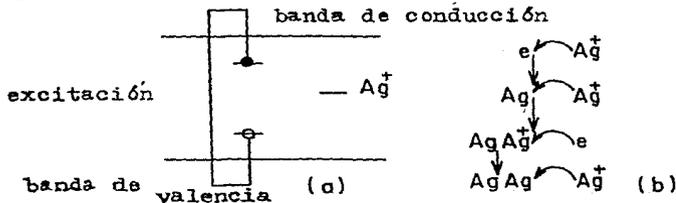


FIGURA (1) a) Niveles de energía de los iones de plata dentro de la banda prohibida de la gelatina.

b) Proceso de neutralización de iones plata al someterlo a radiación ionizante.

La película de emulsión fotográfica tiene cristales de bromuro de plata colocados sobre una capa de gelatina. Por excitación con alta energía se originan pares electrón hueco y ambas son capturadas por trampas. Tanto los iones  $Ag^+$  como los electrones tienden a juntarse y se recombinan originando  $Ag$  neutros, estos representan una nueva trampa para los iones  $Ag^+$  y así se originan iones  $Ag_2^+$ . Por una captura consecutiva de electrones y iones  $Ag^+$  los granos crecen en la gelatina y pueden ser registradas mediante un proceso de revelado. En la película la densidad de la emulsión es casi cuatro veces la del agua, esto se debe particularmente a los granos del bromuro de plata, lo que da lugar a un detector con alto poder de frenado, por lo que las partículas de la radiación incidente llegan al reposo en una corta distancia. Como las estelas que dejan las partículas incidentes son del orden de una micra de ancho la resolución es muy grande.

Este tipo de dosímetro constituye el método más barato de determinar la dosis recibida por el usuario. Otras ventajas son que constituyen un archivo permanente no sujeto a pérdida, y como las películas son pequeñas puede usarse donde los detectores electrónicos no pueden emplearse. Sin embargo presenta entre otras las siguientes desventajas: se requiere demasiado tiempo para su revelado y para su interpretación, su respuesta depende de las condiciones del clima, su exactitud es de un  $\pm 20\%$ . Además se presentan serias dificultades para garantizar la uniformidad del revelado etc.

#### 1.4 TERMOLUMINISCENCIA

Se dice que un material luminesce cuando emite luz al ser excitado. La excitación se puede realizar de diferentes formas como son: por luz, con rayos X, con electrones, termicamente etc.

Los nombres que recibe el fenómeno son fotoluminiscencia, -- luminiscencia de rayos X o radioluminiscencia y termoluminiscencia respectivamente.

En este trabajo nos interesa el fenómeno de la termoluminiscencia.

La termoluminiscencia consta de 2 partes, la primera consiste en exponer el material a radiación ionizante a temperatura fija, la segunda en interrumpir la irradiación y calentar al material. Al gráfico de intensidad luminiscente como función de la temperatura se le denomina curva de brillantez o curva de termoluminiscencia, y a los picos de intensidad máxima se denominan de brillantez. La luz emitida está constituida por fotones de diferentes energías, por lo que si se registra esta luz en función de la longitud de onda se obtiene lo que se conoce como espectro de termoluminiscencia. Este espectro puede presentar varios picos de intensidad máxima, -- denominados picos de emisión.

Es usual registrar la intensidad de la luz emitida a una longitud de observación fija (la de uno de los picos de emisión), como función de la temperatura.

Es posible hacer una separación de los picos de brillantez de la curva de TL por medio de diferentes técnicas ( como

la STANDARD CLEANING ) y a partir de esta separación determinar: el orden de la cinética (primer orden: recombinación de defectos muy próximos y pico simétrico, segundo orden: recombinación de defectos lejanos, pico asimétrico), los factores de frecuencia es decir el inverso del tiempo de relajación y la energía de activación del proceso.

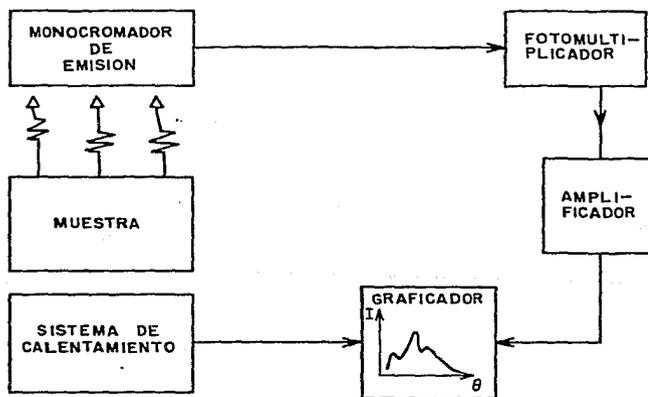


FIG. (2) DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA TECNICA DE TERMOLUMINISCENCIA.

El sistema de calentamiento excita a la muestra, - previamente irradiada originando la termoluminiscencia. La - luz emitida llega al monocromador en donde es seleccionada la longitud de onda de máxima emisión de la muestra previamente tratada.

El haz llega al tubo fotomultiplicador, donde se origina una-

señal proporcional a su intensidad, la cual es amplificada y registrada en la graficadora.

Desde hace algún tiempo el uso de la TL en dosimetría se ha incrementado en forma muy importante puesto que posee grandes ventajas sobre otros sistemas de detección; a continuación se mencionan las más importantes:

- 1) Independencia energética de la señal.
- 2) Respuesta lineal desde miliroentgen y hasta  $10^5$ R (intervalo de interés en dosimetría personal).
- 3) Dimensiones pequeñas del dosímetro que hacen posibles mediciones en una gran variedad de situaciones; por ejemplo: mediciones en el interior de cavidades, determinación de dosis en dedos y manos etc.
- 4) Exactitud de la respuesta aún en el orden de mR.
- 5) Los dosímetros son reutilizables.

Entre sus desventajas podemos mencionar:

- 1) Alto costo del equipo.
- 2) Costo elevado del dosímetro (esto se compensa puesto que cada cristal se puede reutilizar cerca de 40 veces).
- 3) Requiere un intercambio continuo entre el laboratorio y el usuario.

## I.5. MODELOS Y TEORIAS SOBRE LA TERMOLUMINISCENCIA

Para comprender los modelos y teorías que tratan de explicar al fenómeno de la termoluminiscencia (TL) de los halogenuros alcalinos es necesario conocer su estructura, las desviaciones estequiométricas o defectos de esta, así como los defectos producidos por la radiación ionizante.

La mayoría de los halogenuros alcalinos posee una estructura compuesta por dos redes cúbicas centradas en la cara (fcc) interpenetradas, una de ellas está formada por cationes  $M^+$  y la otra por aniones  $X^-$ .

La figura (3) muestra lo que se mencionó en el párrafo anterior.

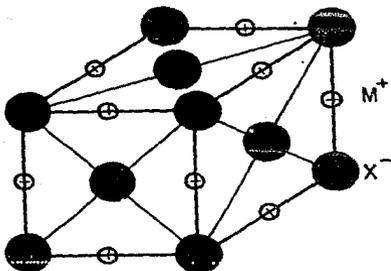


FIGURA (3). Estructura que posee la mayoría de los halogenuros alcalinos.

Las desviaciones estequiométricas en la estructura cristalina, la interacción radiación-materia, dan lugar a los defectos.

En los halogenuros alcalinos los defectos se producen de tal forma que se conserva la neutralidad eléctrica.

A continuación se enlistan y muestran algunos de los defectos mas conocidos en los halogenuros alcalinos (véanse - figuras 4 y 5).

Defecto Schottky: Está formado por una vacancia de anión y una de catión.

Defecto Frenkel: Consiste de un ión intersticial y su vacancia respectiva. Estos defectos tienen una interacción electrostática por lo que tienden a aniquilarse.

Centro  $X_2^-$ : Par de iones halógeno (aniones) que se acercan en la dirección  $\langle 110 \rangle$  y uno de los cuales cede un - - electrón (equivalentemente atrapado un hueco); el electrón - - cedido es atrapado en otro lugar de la red.

Centro H: Atomo intersticial de halógeno (ión halógeno que ha cedido un electrón y que se encuentra en una posición intersticial) ligado a un ión halógeno con el que comparte un sitio en la red.

Centro F: Vacante de ión negativo que ha capturado un electrón y se ha neutralizado.

Centro V: Vacante de ión positivo que contiene en su vecindad el mismo número de huecos que en conjunto poseen - la carga del ión faltante.

Centro  $F_A$ : Centro F' adjunto a una impureza de - - catión.

Centro  $H_A$ : Atomo intersticial asociado a una impureza monovalente sustitucional de catión.

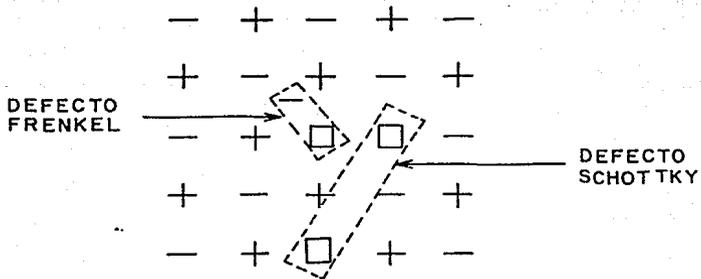


FIGURA (4). Algunos defectos que se presentan en los halogenuros alcalinos.

Centro  $F^+$ : Centro F que ha cedido un electrón.

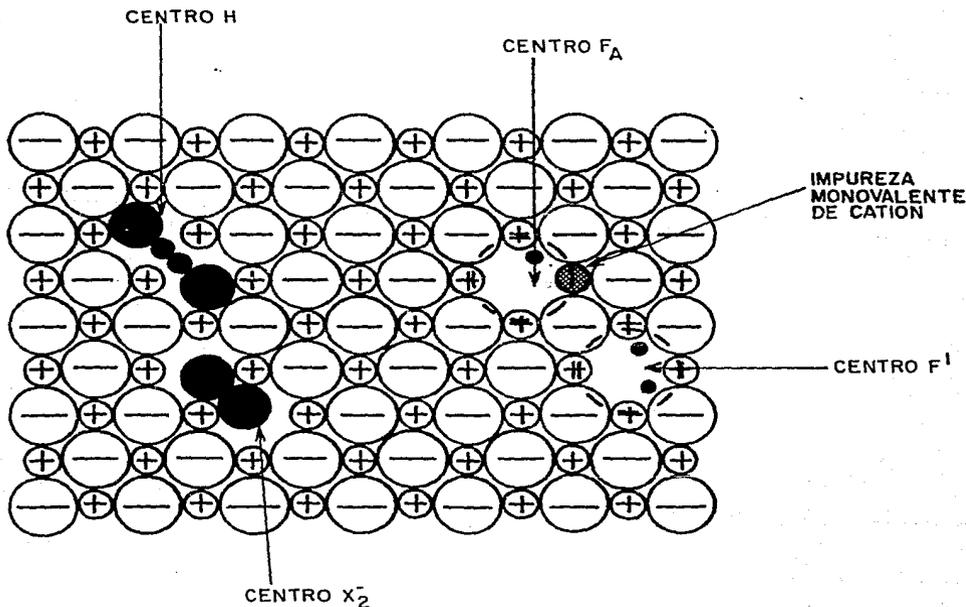
Centro  $F^-$  (antes centro  $F^1$ ): Centro F que ha atrapado un electrón.

Centro  $\infty$ : Vacancia de anión.

Centro  $X^-$  I: Anión intersticial.

Centro  $I_A$ : Intersticial asociado a una impureza monovalente sustitucional de catión.

Centro  $V_K$ : Atomo ó ión que ha cedido un electrón también se conoce con el nombre de hueco.



FIGURA(5) MODELOS DE ALGUNOS DEFECTOS PUNTALES EN HALOGENUROS ALCALINOS .

Es necesario aclarar qué: Primero, varios de los defectos anteriores son complementarios (si se recombinan uno a uno - originan una red perfecta) por ejemplo:

el complemento del centro F es el centro H

el complemento del centro I es el centro  $\alpha$  etc. no son las mismas

Segundo, las estructuras dadas anteriormente ~~no~~ tienen la misma estructura a todas las temperaturas, y es completamente desconocida en algunos casos a algunas temperaturas, sin em - bargo se les denomina de la misma forma por jugar el mismo - papel de un defecto determinado. Por ejemplo: a bajas tempera - turas se ha sugerido que el centro H posee la estructura  $Cl_4^{3-}$  ocupando 3 sitios en la red como se muestra en la figura.

En los modelos de TL son considerados cuatro elementos - básicos: las trampas, los centros de recombinación, los entes móviles y los defectos complementarios.

En el estudio de la TL de los halogenuros alcalinos la - identificación de los elementos anteriores se simplifica bas - tante efectuando la irradiación en distintos regímenes de - - temperaturas.

Cuando un halogenuro alcalino es sometido a radiación - ionizante se originan una serie de reacciones que producen la formación de defectos iónicos, este mecanismo de radiólisis - involucra 2 tipos de procesos:

Proceso primario. Origina pares electrón hueco que se re - lajan dando lugar a un excitón autoatrapado (6), el excitón - decae en forma no radiativa originando pares de defectos F, H o  $\alpha$  e I dependiendo de la temperatura de irradiación.

El mecanismo de formación de pares de defectos F-H es el - siguiente: un ión halógeno  $X^-$  se mueve hacia una posición - -

intersticial cediendo un electrón a su vacancia (formando un centro F) y comparte con otro ión halógeno vecino un sitio - en la red (originando un centro H) (7), el decaimiento - - excitónico no radiativo proporciona impulso por lo que los - pares de defectos F-H se pueden separar, este es posible - - puesto que solo es requerida una pequeña cantidad de energía de activación (aproximadamente .02-.03 eV.) (8)

Cabe mencionar que a temperaturas bajas es posible la recombinación radiativa del par electrón-hueco, esto origina una emisión luminiscente intrínseca denominada  $\Pi'$  (baja - - energía en estado triplete y  $\sigma\sigma$  (alta energía en estado sin - glete), dependiendo del estado del orbital del electrón exc - tado (9).

Proceso secundario: comprende la estabilización de - algunos de los defectos mencionados anteriormente. Las vacan - cias, los átomos intersticiales y los iones se mueven a través de la red por lo que pueden ser atrapados o recombinarse con otros defectos.

Estos procesos pueden ser inducidos tanto térmicamen - te como por radiación. Consisten fundamentalmente en la - - captura de los defectos intersticiales de halógeno (comple - mento de los centros F) en trampas que pueden ser vacancias - o impurezas en el caso de cristales dopados con ellas (10).

#### TERMOLUMINISCENCIA DE MUESTRAS IRRADIADAS A 4°K

En irradiaciones a temperaturas cercanas al cero - absoluto la actividad térmica de los procesos secundarios es inhibida completamente, tomando lugar solamente el proceso - primario de la irradiación (es decir, la formación de centros F y H, de ce I, entre otros) el calentamiento posterior a la -

irradiación origina procesos de recuperación tales como la recombinación de centros F y H, centros  $\alpha$  e I ó centros  $V_k$  y electrones originando la TL; sin embargo distintos experimentos usando absorción óptica de estos defectos han revelado que la TL es más que una recombinación de centros F y H (8) que exhibe emisiones  $Tl$  y  $\sigma$ . Se han sugerido los siguientes procesos para explicarla:

1) Recombinación de centros I y F liberándose electrones que se recombinan con centros  $V_k$  originando ambas emisiones,  $Tl$  y  $\sigma$ .

2) Recombinación de centros H y  $F^-$  liberándose electrones que se recombinan con centros  $V_k$ .

Los procesos anteriores son válidos en la explicación de los picos de brillantez de baja temperatura en diferentes halogenuros alcalinos (por ejemplo NaCl, KBr etc.) (9)

El principal efecto del dopado con impurezas es reducir algunos picos de brillantez (8) (puesto que disminuye la creación de centros F en el caso en que las impurezas atrapen electrones) e introducir nuevos picos de brillantez (asociados con la recombinación de centros  $V_k$  y electrones que parecen ser liberados de las impurezas).

Antes de continuar aclararemos que todos los procesos que se mencionan a continuación son especulaciones que tratan de explicar el fenómeno de la TL. Un modelo unificado del proceso termoluminiscente no está disponible hasta donde se conoce actualmente.

## TERMOLUMINISCENCIA DE MUESTRAS IRRADIADAS A 80°K.

A esta temperatura los centros H tienen gran movilidad por lo que son capaces de viajar a través de la red. Esto - - origina una disociación de pares F-H por lo que puede ocurrir agregación de centros H en trampas intersticiales (lo que - - origina una gran variedad de otros tipos de defectos), también es posible la difusión de excitones y de centros  $V_k$ . Como resultado de los procesos anteriores se obtiene una curva de - - brillantez mucho mas compleja en cuanto al número, tamaño y - - posición de los de los picos de brillantez.

Han sido realizados estudios sobre diferentes halogenuros alcalinos irradiados a esta temperatura y se han sugerido una serie de procesos para explicar el comportamiento de sus curvas de brillantez.

A continuación se proporcionan algunos ejemplos:

Cristales de KBr fueron irradiados (11) con luz ultravioleta-monocromática, se observaren picos de brillantez a aproximadamente 103°K, 120°K y 158°K, la razón de calentamiento fué de 25°K  $\text{min}^{-1}$ .

Los picos de 120 y 158°K aparecen después de fotoestimar - - con luz en la banda F a la muestra, esto indica que ellos - - están asociados con la liberación térmica de electrones de - - centros F, así como de migración de intersticiales.

El pico de 103°K no es estimulado por luz en la banda F por lo que no proviene de centros del tipo F o V por lo que - - los autores concluyen que este pico proviene de la recombinación radiativa de un par Frenkel, es decir de la recombinación de centros  $I_A \rightarrow \infty$  ( $I_A$  ión intersticial atrapado en el lugar -

de una impureza alcalina).

Jiménez de Castro y Alvarez Rivas (12) sometieron a irradiación X muestras de KCl monocristalino a 80°K en la curva de brillantez obtenida observaron emisiones máximas a las temperaturas de 100, 120, 165, 200, 220, 230, 275, y 290°K. Los autores observaron que para cada uno de los picos anteriores existe un proceso de recuperación de centros F excepto para el pico de 200°K.

Itoh (13) reporta grandes recuperaciones de centros  $H_A$  a 120K y 240K esto hace suponer que los picos de brillantez de 120 y 230K son originados por recombinaciones de centros F y átomos intersticiales de Cl, (es decir recombinación de centros F-H).

También reporta la recuperación de un centro  $H_A$  (átomo intersticial de cloro atrapado en una impureza) a 170K que está de acuerdo con la posición del pico de 165°K. En resumen todos los picos parecen estar relacionados con centros F recombinados con intersticiales.

En el pico de 200°K observaron un fuerte movimiento de carga (esto fue determinado por medio de la técnica de corrientes termoestimuladas) por lo que su origen ha sido asociado a la aniquilación de centros  $V_k$  con electrones. Otro posible origen del pico de 200°K es una recombinación de centros  $I_A - \infty$  puesto que los autores (21) han observado emisión de TL a longitudes de onda correspondientes al estado de excitación de la banda  $\infty$ .

Jiménez de Castro y Alvarez Rivas (14) hicieron estudios sobre la TL del NaCl irradiando a una temperatura de 80°K. Ellos observaron picos de brillantez a 89, 98, 117, 211,

236, 145, 170, 253, °K en la curva de TL.

Estos picos están relacionados con electrones que son liberados de trampas y que recombinan con centros  $V_k$ . Se sugiere - este proceso puesto que la curva de corriente termoestimulada de cada uno de los picos es intensa, lo cual implica un fuerte movimiento de cargas.

Sin embargo en los picos de 145, 170, 253, y 285°K observaron una fuerte recuperación de centros F por lo que sugieren como origen la recombinación de pares F-H.

A pesar de lo anterior otros autores sugieren que el pico de 170°K se debe a recombinación entre centros  $V_k$  - e puesto que observaron emisión II.

Por último, la presencia de impurezas en los halogenuros alcalinos introduce emisiones características del material dopador, altera la longitud de onda de emisión característica del material, reduce la intensidad de algunos picos de brillantez (con respecto a muestras puras) y origina - - nuevos centros de color que dan lugar a nuevos picos de - - brillantez.

## TL DE MUESTRAS IRRADIADAS A TEMPERATURA AMBIENTE

La termoluminiscencia de halogenuros alcalinos irradiados a temperatura ambiente ha sido extensamente estudiada por varios años, por ello existe un gran número de artículos en donde han sido discutidos ampliamente los posibles mecanismos que toman parte en ella, sin embargo ninguno de estos es del todo convincente.

Algunos modelos se complementan, otros explican parte del fenómeno. Como sea los modelos tienen sus pros y sus contras por lo que no es posible tomar alguno como el más universal. Cabe aclarar que a temperatura ambiente todos los defectos mencionados anteriormente son inestables por lo que la TL surge de un nuevo conjunto de procesos.

Las teorías más antiguas explican el fenómeno de la TL proponiendo una recombinación entre huecos y electrones en movimiento.

Modelos más recientes consideran que los centros F juegan un papel primordial en la TL sin embargo no se sabe exactamente la forma en que actúan, esto ha originado una serie de conjeturas sobre la TL, como las que se mencionan a continuación:

- 1) Los picos de brillantez resultan de la liberación térmica de huecos desde trampas de diferentes clases, recombinándose con electrones o centros F.
- 2) Los últimos modelos sugieren que la TL está fuertemente asociada a las recombinaciones intersticial-vacancia.

Es posible sin embargo, que ocurran ambos tipos de recombinación.

Se ha encontrado sin embargo, que a temperatura ambiente, los entes intersticiales son móviles y dan origen a la formación

de grandes agregados intersticiales, estos tienen la forma de moléculas neutras de halógeno que ocupan pares de vacancias - anión-cación, estos pares de vacancias han cedido intersticiales originando dislocaciones (defectos lineales) en la red. - Los defectos formados por las moléculas de halógeno dan lugar a bandas de absorción llamadas V.

Si el material es calentado hasta temperaturas de  $550^{\circ}\text{K}$  una vez que ha sido irradiado, las bandas de absorción de los - - centros V y F desaparecen. Hughes <sup>(13)</sup> propone la siguiente - reacción para la recuperación del cristal: (\*)  $2F + X_2 \rightarrow$  Par de vacancias (para temperaturas hasta  $550^{\circ}$ ) por lo que el - - cristal queda con pares de vacancias y dislocaciones. A temperaturas superiores ( $600$  y  $700^{\circ}\text{K}$ ) los pares de intersticiales - en la red se aniquilan con los pares de vacancias desocupados, es decir, par de vacancias + par de intersticiales  $\rightarrow$  red perfecta por lo que la recuperación se lleva a cabo y se emite TL.

Desde el punto de vista de la TL, es importante - - mencionar que el área bajo la curva de brillantez es directamente proporcional a la concentración de los centros F, por lo que la reacción (\*) parece dar origen a esta. Por el mecanismo anterior han sido interpretadas las curvas de brillantez de los fósforos KCl, KBr, KI, NaF y NaCl. Una importante - - observación para estos argumentos es que para cada pico en la curva de brillantez hay una aniquilación correspondiente de - centros F, como ilustra la figura (6).

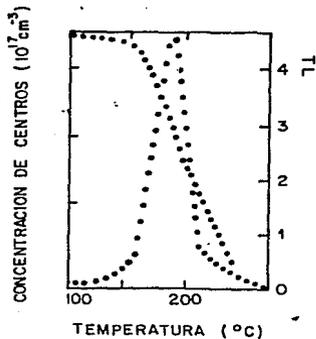


FIGURA (6) Disminución de centros F y el correspondiente pico de brillantez en KCl irradiado a temperatura - - ambiente.

Es necesario resaltar que la forma de la curva de brillantez depende entre otros aspectos de: el tratamiento térmico - previo a la irradiación, la exposición a la que ha estado sujeta la muestra, la forma en que se desexcita ésta, etc. En materiales dopados, la alteración de las emisiones depende de las características de la impureza dopadora. Las observaciones por medio de experimentos de corrientes termoestimuladas y resonancia paramagnética muestran que las impurezas que no cambian de valencia durante la irradiación actúan fundamentalmente como - trampas para intersticiales.

## 1.6 ANTECEDENTES DE EMPLEO DE LA TL EN DOSIMETRIA.

Probablemente el fenómeno de la TL haya sido observado - en la prehistoria, los alquimistas observaron que ciertos materiales tales como la fluorita exhiben una brillantez transitoria cuando están siendo calentados en la oscuridad. Este fenómeno (llamado TL) es la base de uno de los más importantes - métodos de detección de la radiación llamado dosimetría termoluminiscente (DTL).

El fenómeno mencionado fué descrito en el año de 1663 - por Sir Robert Boyle. Becquerel lo redescubrió en 1883. En - 1895 Wiedeman y Schmidt lo usaron para detectar radiación - ionizante. En 1925 Wick publicó un trabajo a cerca de los - efectos de los rayos X en la TL. En 1945 Randall y Walkin desarrollaron un modelo sobre las curvas de brillantez, sin embargo fué hasta terminada la segunda guerra mundial cuando la DTL recibió un fuerte impulso y en el año de 1950 un gran número de materiales termoluminiscentes fueron examinados para emplearlos en DTL. En este año el fenómeno de la TL adquirió gran interés cuando Daniels propuso que podía ser usada como para detectar radiación. Un año más tarde Daniels junto con - su grupo de investigación desarrollaron instrumentación para este proposito. La primera aplicación de la TL en dosimetría - fué realizada por Daniels y su grupo de investigadores utilizando LiF para medir la radiación recibida por un paciente - sometido a una dosis terapéutica de Iodo radiactivo, el paciente tragó un cristal de LiF, el cristal fué recuperado después de pasar por el aparato digestivo y la TL del LiF fué medida

y se logró determinar la dosis recibida. En esta misma década otros grupos de trabajo tomaron la idea de la DTL. Schulman - investigó la DTL del fósforo  $\text{CaF}_2$  Mn, en Bélgica Schayes (4) - desarrollaron un dosímetro usando  $\text{CaF}_2$ . También se realizaron trabajos sobre esto en la U.R.S.S. y Alemania. A partir de - 1960 se incrementaron las investigaciones y uso de la DTL debido a las ventajas que posee sobre otros métodos de detección y medición de la radiación ionizante.

## 1.7 CARACTERISTICAS IDEALES DE UN BUEN MATERIAL DTL.

A continuación se enumeran las características a las que debe aproximarse un buen material DTL. (15)

- 1.- Alta eficiencia TL. La respuesta termoluminiscente debe ser lo suficientemente intensa como para poderse detectar fácilmente.
- 2.- Respuesta lineal de la TL con la dosis. En la mayoría de las aplicaciones es ventajoso tener una relación lineal entre TL y dosis puesto que esto facilita el uso de la curva de calibración. Algunos DTL no responden linealmente por lo que requieren de una cuidadosa calibración en el rango de dosis de interés. La no linealidad complica la determinación de la respuesta del material empleado como DTL (fósforo).
- 3.- Reproducibilidad. La desviación estandar de las medidas realizadas bajo ciertas condiciones debe tender a cero, es decir bajo ciertas condiciones preestablecidas la respuesta del DTL debe ser la misma si estas condiciones se mantienen constantes.
- 4.- Estabilidad de la información (estabilidad de los portadores móviles capturados). La señal TL no debe cambiar con el tiempo transcurrido después de haberse irradiado la muestra.
- 5.- Estabilidad de la respuesta TL del material a temperatura ambiente. La respuesta del fósforo debe ser estable, la respuesta TL no debe cambiar al mantenerse la temperatura constante.

La TL es la liberación en forma de luz visible de la --

energía absorbida durante la irradiación, la forma en que es liberada depende de la temperatura a la cual se encuentra el fósforo y se incrementa agudamente con altas temperaturas.

- 6.-Espectro de TL entre 300 y 500 nm donde los fotodetecto - res comerciales responden bien.
- 7.-Resistencia contra factores ambientales. Debe ser immune- a la humedad, cambios bruscos de temperatura etc.

## 1.8 ALGUNOS MATERIALES USADOS EN DTL.

Existen varios materiales empleados en dosimetría, los más utilizados son los de fluoruro de litio, estos en distintas presentaciones tales como polvo, cuadros, barras rectangulares y circulares.

La tabla 2 (16) nos proporciona una lista de los principales fósforos utilizados como DTL así como algunas de sus características.

T A B L A 2

Lista de algunos fósforos empleados como DTL.

37

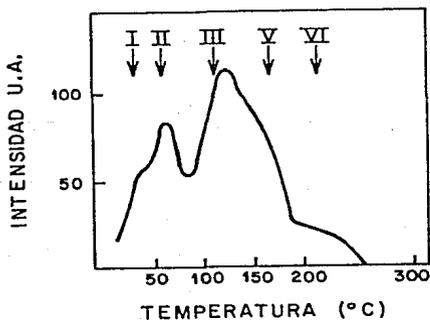
PROPIEDAD	LiF (TLD-100-600-700)	Li2B4O7:Mn (TLD-300)	CaF2 :Mn (TLD-400)	CaSO4:Mn (TLD-200)	CaSO <sub>4</sub> :Mn	CaSO <sub>4</sub> :Dy	Ca F2 (TLD-200)
DENSIDAD (gm. cc)	2.64 (POLVO 1.3)	2.4 (CIN TAS) 1.2 (POL- VO)	3.18	3.18	2.61	2.61	3
No. ATOMICO EFECTIVO - (2) PARA AB- SORCION FO- TOELECTRI- CA.	8.2	7.4	16.3	16.3	15.3	15.5	
ESPECTRO - DE EMISION TL	3500-6000Å (4000 - MAX)	53000 -6300Å (6050- MAX)	4400 -6000Å (5000- MAX)	PICOS A - - 4835Å A - - 5765Å	4500 -6000Å (5000- MAX)	4800Å: 5700Å	Å 440 a 6100 Å
TEMPERATURA DEL PICO - PRINCIPAL.	195°C	200°C	260°C	180°C	110°C	220°C	200°C 240°C

EFICIENCIA CON $^{60}\text{Co}$ RESPECTO A LiF	1.0	0.15	10	30	70	30	30
DEPENDENCIA ENERGETICA 30 Kev/ $^{60}\text{Co}$	1.25	0.9	13	12.5	10	12.5	
INTERVALO UTIL	mR- $5R$ $3 \times 10^5 R$	50mR $-10^6 + R$	mR- $5R$ $3 \times 10^5 R$	10 R $-10^6 R$	$R_4$ $-10^4 R$	$R_5$ $-10^5 R$	$1 \text{ mR}-10^6 R$
DESVANECIMI ENTO.	DESPRECIA BLE. 5%/año a $20^\circ\text{C}$	5% en 3 meses	10% - primeras 16 h. 15% - en 2 - - semanas	10% - prime ras - 24 h. 16% - en 2- sem.	50% - prime ras - 24 h.	2% - en 1 mes 8% - en 6 meses	
FORMAS - FISICAS.	Polvo, cris tales extru idos, encaps ulados en - teflón, en - vidrio, com pactados.	Polvo. Pastillas. Teflón.	Polvo, comprimi dos, encaps ulado en bulbos de vidrio.	Polvo, crista les - bulbos de vi drio.	Polvo. Teflón.	Polvo	POLVO Cristales

TABLA No. 2 PROPIEDADES DE ALGUNOS FOSFOROS UTILIZADOS  
EN DOSIMETRIA TERAOLUMINISCENTE.

## 1.9 TERMOLUMINISCENCIA DEL NaCl:Mn<sup>2+</sup>.

En esta sección tratamos la TL del NaCl:Mn<sup>2+</sup>. Se trata separadamente de los modelos de TL puesto que es el fósforo-objeto de estudio de este trabajo. A continuación describiremos algunos de los aspectos mas relevantes de las características termoluminiscentes del NaCl:Mn<sup>2+</sup>. En estudios anteriores sobre TL (17,18) se obtuvieron los siguientes resultados: - a) El espectro TL muestra 6 picos de brillantez, esto se ilustra en la figura (7).



PICO	TEMPERATURA °C
I	41
II	65
III	113
IV	129
V	170
VI	216

FIGURA 7. ESPECTRO TL. DEL NaCl:Mn<sup>2+</sup> PARA UNA MUESTRA  
TEMPLADA E IRRADIADA POR 5 HORAS.

- b) Si la muestra recibe un tratamiento de templado antes de irradiarse aumenta la emisión termoluminiscente.
- c) Para muestras templadas el area bajo la curva de brillantez disminuye al aumentar el tiempo de irradiación.

d) En los espectros de termoluminiscencia se observan dos -  
emisiones con longitudes de onda centradas en 595 y 400 nm.-  
(17).

Los resultados anteriores corresponden a muestras con una -  
concentración de Mn de 90 ppm, la irradiación fué realizada-  
a temperatura ambiente bajo las condiciones 50 Kv-40mA, una-  
durante diez minutos y otras durante cinco horas.

Los autores de los experimentos anteriores (17,18) su-  
gieren los siguientes mecanismos como causa de los resultados  
observados:

Asocian a los picos I y II con impurezas disueltas puesto -  
que: el pico I depende en forma notoria del tiempo transcu -  
rrido entre el templado de la muestra y su irradiación, es -  
decir en la misma forma en que depende de esta variable la -  
concentración de vacancias libres, la evolución del pico II-  
con el tiempo transcurrido entre la irradiación y el templa-  
do de la muestra es similar a la evolución de los dipolos -  
Mn<sup>+</sup>-vacancias.

Asocian el pico V con grandes agregados de impurezas de Mn -  
puesto que es muy intenso cuando la muestra no ha sido tem -  
plada.

El pico VI es independiente del tiempo transcurrido entre el  
templado y la irradiación de la muestra, tiene una posición-  
análoga a uno de los picos de TL de la curva de brillantez -  
de NaCl puro, su energía de activación y su orden de cinéti-  
ca también son análogas a la de dicho pico. Por todas las -  
causas anteriores se piensa que es intrínseco del NaCl.

Los picos restantes tienen un origen totalmente incierto.

La correlación entre los picos de TL y los diferentes estados de agregación del Mn puedan atribuirse en parte a -- defectos originados por esta impureza pero también pueden -- atribuirse a los "centros de luminiscencia" (centros activados y centros atrapados de huecos).

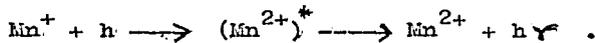
Parece ser más probable que la cinética de la emisión de la luz sea controlada por defectos de Mn que actúan como -- trampas. Desde este punto de vista, Alvarez Rivas (17) asocia a los picos de brillantez con los siguientes defectos:

PICO	No.	ASOCIADO CON
	I	$Mn^{\circ} - C$ ( $Mn^{\circ}$ intersticial)
	II	$Mn^{\circ} - C$ y $Mn^{+}$
	III	$Mn^{+}$
	IV	
V y VI		$Mn^{\circ} - D$ ( $Mn^{\circ}$ sustitucional de -- anión con suvacancia contigua).

Donde  $Mn^{\circ}$  es un átomo (neutro) de manganeso. Los picos de -- brillantez están asociados a diferentes defectos que actúan -- como atrapadores de huecos y a distintos activadores de iones Mn.

Respecto a las emisiones de 400 y 595 min. observadas en la curva de brillantez, es bien conocido (19) que la segunda -- resulta del siguiente mecanismo:

Un hueco es atrapado por un ión  $Mn^{+}$  originando un ión  $Mn^{2+}$  -- en el primer estado excitado, este ión decae al estado base -- originando a la TL.



La emisión a 595 nm corresponde a la transición  $4G \rightarrow 6S$  del ión Mn. El origen de la emisión de 400 nm puede resultar de la recombinación entre centros F y H y es llamada intrínseca. Lo anterior fué sugerido por Alvarez-Rivas-Delgado (19). Otra explicación que se ha sugerido es que esta emisión resulta de la liberación de un centro  $V_K$  que se recombina con un  $\text{Mn}^+$  (20). La emisión de 400 nm también se ha asociado con la aniquilación de centros F por intersticiales de halógeno liberados térmicamente de trampas (21).

CAPITULO II  
EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

## II. CALIBRACION

Los dosímetros termoluminiscentes no son detectores absolutos de la radiación, no presentan un camino directo -- para relacionar la señal termoluminiscente de la muestra -- pre-irradiada con la exposición de la radiación e con la cantidad de dosis absorbida. Como consecuencia de lo anterior -- todos los sistemas de dosimetría termoluminiscente deben exponerse a cantidades conocidas de radiación ionizante con el -- fin de obtener un patrón de referencia (o curva de calibración) Cuando el fósforo dosímetro TL. se somete a una exposición -- desconocida, su señal termoluminiscente deberán compararse -- con la de la curva de calibración para así obtener el valor -- de la exposición.

Es importante mencionar que la sensibilidad del dosímetro termoluminiscente depende de un gran número de parámetro entre -- los cuales se encuentran; La forma en que se realiza la lectura, la forma de desexcitación de la muestra, el tiempo entre -- la exposición y la lectura etc. Es conveniente calibrar individualmente cada uno de los fósforos usados como DTL, puesto -- que así se evitan errores en las evaluaciones de las dosis -- absorbidas. Las calibraciones de los cristales consisten en obtener curvas intensidad termoluminiscente contra exposición.

### DESVANECIMIENTO

Como se indicó en la sección I.7, una de las -- características que debe poseer un buen material DTL es la de conservar la información durante largos periodos de tiempo, --

sin embargo existen diversos factores que afectan negativamente el almacenamiento de la señal por lo que la evaluación final de esta no nos proporciona un valor real de la exposición o de la dosis absorbida. Entre los factores que afectan a la señal TL se encuentran, la temperatura y la radiación electromagnética. A temperatura ambiente, los entes creados durante la irradiación son inestables porque existe liberación térmica de huecos por trampas dando lugar a recombinaciones de estos y distintos centros de color. Por esta causa (entre otras), la señal TL de nuestro dosímetro no nos proporciona un valor real de la cantidad de dosis que absorbió, como consecuencia de ello es necesario investigar el comportamiento de la señal termoluminiscente como función del tiempo transcurrido entre su irradiación y su lectura (desvanecimiento) con el fin de buscar una regla de uso para el dosímetro para que su señal sea lo mas estable o en su defecto realizar las correcciones respectivas.

#### E N V E J E C I M I E N T O .

Estudios previos han mostrado que la respuesta TL de los fósforos es función del tiempo transcurrido entre el templado de la muestra y su irradiación, esto se debe al estado de agregación de las impurezas (entre otros factores). Debido a la fuerte dependencia de la señal termoluminiscente con el tiempo transcurrido entre su templado y su irradiación se consideró necesario realizar experimentos de envejecimiento del  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$ , con esta información se obtuvo una regla que permite usar de manera mas eficiente como DTL al  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$ .

## II. 2 CARACTERISTICAS GENERALES

El tratamiento de templado se efectuó calentando primero la muestra a  $580^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos y luego sacándola y dejándola caer rápidamente en una placa de cobre a temperatura ambiente en donde se abanicó por ambos lados (todas las muestras se templaron antes de irradiarse). Estando templada (s) la (s) muestra (s) se montó (aron) en una placa de aluminio (portamuestras) para después introducirse en la cámara de irradiación del equipo de rayos X. La cámara cuenta con una placa de aluminio de 1 mm. de espesor entre el haz y la muestra que sirve como filtro para eliminar los rayos X débiles, con esto se logra un daño más uniforme en las muestras.

Las irradiaciones de las muestras se llevaron a cabo a temperatura ambiente con un equipo de rayos X marca Phillips modelo PW17929 operando a 15 Kv como voltaje de aceleración y 14 mA como corriente del filamento. Bajo estas condiciones, la razón de exposición fue de 0.9 roentgen/mi<sub>n</sub>uto, esto se determinó empleando muestras de LiF TLD 100 comerciales calibradas y leyendo su respuesta en un aparato comercial (Harshaw).

Para detectar la señal TL se utilizó un fluorímetro marca Perkin Elmer modelo 650-10 S con una lámpara de Xenón de Osram modelo 150 así como una graficadora Perkin Elmer modelo 56.

Se emplearon las siguientes condiciones de operación:

Fluorímetro: -

Longitud de onda del monocromador de emisión 595 nanómetros, ventana de 20 nm, puesto que la emisión mas intensa del manganeso se encuentra en esta longitud de onda (15).

Ganancia: Alta, grueso en 30 o menos según la intensidad de la señal, fino en 8.

Como no se emplea la lámpara de excitación se cierra la ventana con una placa.

Graficadora: Velocidad, 20 mm/min., plumilla de temperatura en 10 y 20 milivolts y plumilla de la señal TL en un volt. - El cero de la señal TL se ajusta en forma conveniente con la perilla zero adjust del fluorímetro.

Desexcitación de las muestras:

Se realizó calentándolas en forma aproximadamente lineal - - desde temperatura ambiente ( $23^{\circ}\text{C}$ ) hasta  $271^{\circ}\text{C}$  a una razón de  $51.2^{\circ}\text{C min}^{-1}$ .

El sistema de calentamiento está compuesto por un caudín - - comercial marca Torio México modelo 30 watts a 125 volts que se conecta directamente a la línea.

Para medir la temperatura se usó un termopar de cromel-alumel que está anclado al caudín muy cerca de la muestra, el termopar cuenta con un circuito electrónico corrector de punta - fría, marca Omega, con lo cual la diferencia de potencial - del termopar da la temperatura de la muestra sin necesidad - de corregir por la temperatura ambiente.

En la siguiente página se encuentra la figura correspondiente.

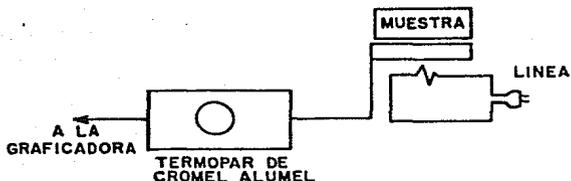


FIGURA 8. Diagrama de bloques del sistema de desexcitación.

#### Características del sistema de detección:

El monocrómator está formado por rejillas cóncavas, posee un rango de longitudes de onda desde 220 a 830 nm., su resolución es menor o igual a 1.5 nm., la exactitud de la longitud de onda es de  $\pm 2$  nm. o superior. El detector es un tubo fotomultiplicador Hamamatsu R372F, posee 6 sensibilidades diferentes y la respuesta puede ser rápida, normal o baja (0.5, 2 ó 6 segundos respectivamente).

## II 2 a) CALIBRACION.

Consistió en exponer la muestra a radiación X por un minuto e inmediatamente obtener su curva de brillantez. Se esperó aproximadamente 24 horas (puesto que por ensayo y error se determinó que solo si la muestra se reutilizaba en otra irradiación a 24 horas e más se lograba reproducibilidad en la respuesta TL, es decir el  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$  posee memoria), templamos e irradiamos 2 minutos y obtuvimos en seguida su curva de brillantez. Repetimos los pasos anteriores pero incrementando el periodo de exposición por 1 minuto en cada ocasión sucesiva (ver diagrama) hasta que los máximos de la curva de brillantez comenzaron a incrementarse en forma no lineal. Ver diagrama 1.

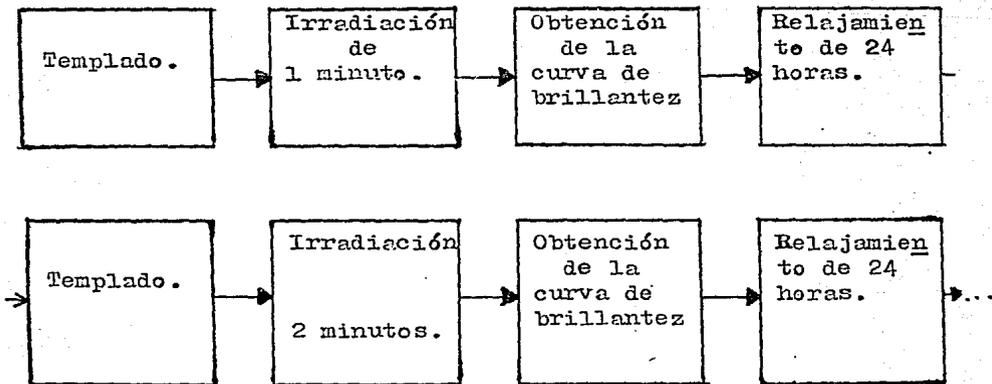


Diagrama 1 Calibración de la muestra.

De las curvas de brillantez obtenidas se seleccionaron los picos que F.J. López y F. Jaque denominaron III, IV y V, nosotros los etiquetamos como 1, 2 y 3 respectivamente - - (para todos los experimentos) por ser los mas intensos bajo nuestras condiciones de trabajo. La figura 10 muestra una - curva típica de TL del  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$ .

Los demás picos no se ven porque al calentar tan rápidamente, en uno solo de nuestros picos están metidos dos o mas - de los observados por ellos.

Calibración. Los datos proporcionados en las tablas C1 y C2 corresponden a las intensidades de los picos 1, 2 y 3 - - (divididas entre el espesor de la muestra para normalizarlas) como función de la exposición.

TABLA C<sub>1</sub>  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$  6.2 ppm.

TIEMPO DE IRRADIACION MINUTOS	EXPOSICION ROENTGEN .	I N T E N S I D A D		
		UNIDADES ARBITRARIAS		
		PICO 1	PICO 2	PICO 3
2	1.8	8.81	7.71	8.81
3	2.7			
4	3.6	33.04	27.53	20.93
5	4.5	63.87	47.36	30.84
6	5.4	77.64	52.86	39.65
7	6.3	92.51	64.98	44.30
8	7.2	96.92	61.67	47.36
9	8.1	112.33	69.38	46.26
10	9.0	125.55	72.68	50.66
11	9.9	151.98	95.81	59.47
12	10.8	214.76	125.55	89.20

La representación de estos datos se encuentran en las - - gráficas C<sub>1</sub> a) y C<sub>1</sub> b).

TABLA C<sub>2</sub> NaCl:Mn<sup>2+</sup> 86.9 ppm.

TIEMPO DE IRRADIACION MINUTOS	EXPOSICION ROENTGENS.	I N T E N S I D A D		
		UNIDADES ARBITRARIAS		
		PICO 1	PICO 2	PICO 3
1	0.9	26.57	42.52	18.60
2	1.8	31.00	54.03	21.26
3	2.7	61.17	74.40	33.66
4	3.6	62.00	79.71	53.14
5	4.5	85.03	108.03	39.86
6	5.4	90.34	132.86	50.49
7	6.3	95.65	127.55	53.14
8	7.2			
9	8.1	212.58	255.10	127.55
10	9.0	434.01	611.16	256.87
11	9.9	513.73	699.73	256.87
12	10.8	602.3	752.88	327.72

Estos datos se encuentran representados en las gráficas C<sub>2</sub> a) y C<sub>2</sub> b).

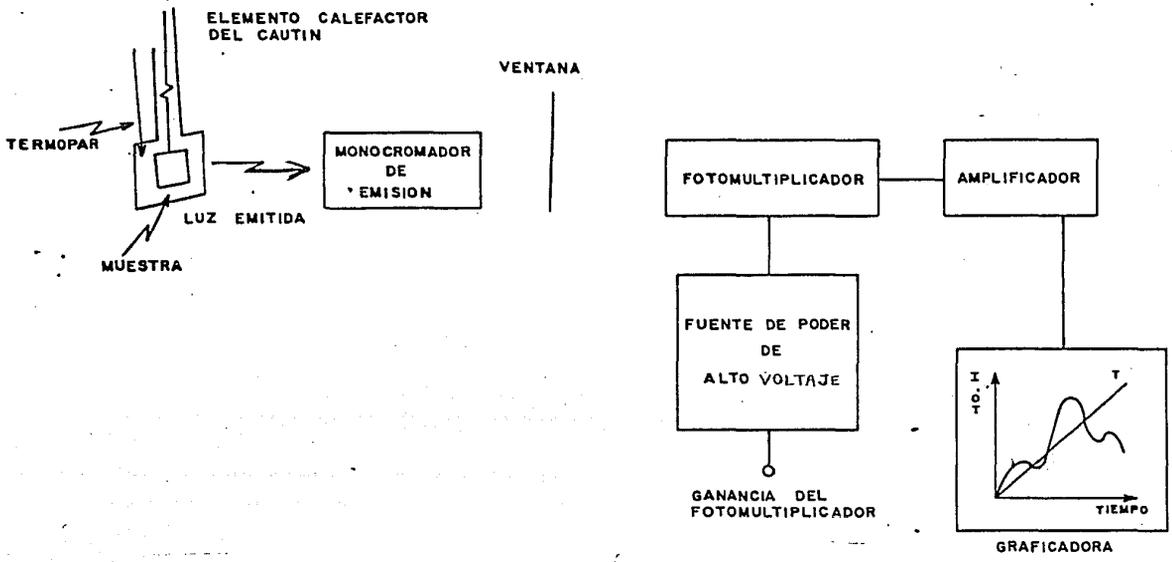


FIGURA 9: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE DETECCION.

## II 2 b) DESVANECIMIENTO

La muestra se templó e irradió a una exposición fija (6 minutos en las condiciones de rayos X señaladas, es decir- 5.4 R), en seguida se envolvió en papel aluminio y se guardó - por espacio de 24 horas, después de este se obtuvo su curva - de brillantez, se volvió a templar, se irradió y se guardó - para leerse 2 días después. El procedimiento anterior se - - repitió varias veces pero aumentandose el periodo entre irradiación y lectura. El experimento de desvanecimiento se dió - por concluido cuando la señal TL dejó de depender del periodo entre irradiación y lectura (ver diagrama 2). En este experi- - mento no se consideró la memoria de que posee el  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$ .

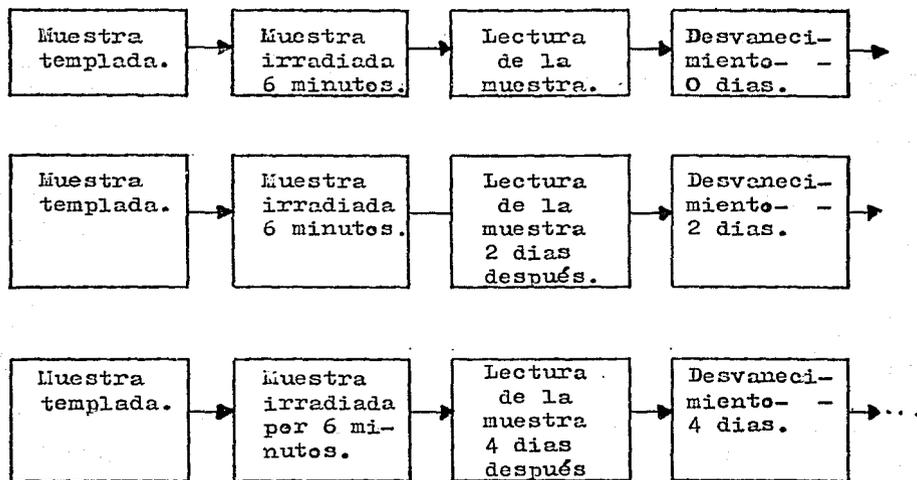


Diagrama 2 Experimento de desvanecimiento.

Los datos proporcionados en las tablas D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> - - fueron divididos entre el espesor de las muestras respectivas y normalizadas con respecto a tiempo de desvanecimiento cero.

TABLA D<sub>1</sub> NaCl:Mn<sup>2+</sup> 6.2 ppm.

DESVANECIMIENTO (DIAS)	INTENSIDAD RELATIVA		
	PICO 1	PICO 2	PICO 3
0	1.000	1.000	1.000
2	0.040	0.694	0.867
4	0.000	0.486	0.733
6	0.020	0.475	
12	0.021	0.202	0.369
21	0.000	0.038	0.190

Estos datos están representados en la grafica D<sub>1</sub>

TABLA D<sub>2</sub> NaCl:Mn<sup>2+</sup> 86.9 ppm.

DESVANECIMIENTO (DIAS)	INTENSIDAD RELATIVA		
	PICO 1	PICO 2	PICO 3
0	1.000	1.000	1.000
3	0.022	0.606	0.866
9	0.022	0.504	0.853
10	0.014	0.424	0.437
13	0.011	0.170	0.276
15	0.037	0.104	0.244
21	0.044	0.070	0.189

Estos datos están representados en la grafica D<sub>2</sub>

## II 2 c) ENVEJECIMIENTO.

Estando templada la muestra se irradió por 6 minutos y se obtuvo su curva de brillantez, se volvió a templar la muestra se guardó en papel aluminio por dos días, pasados estos se expuso a rayos X por 6 minutos, a continuación se obtuvo su respuesta TL, se volvió a templar, se guardó envuelta en papel aluminio para irradiarse y leerse 7 días después, los pasos anteriores se repitieron varias veces (siempre incrementando al periodo entre templado e irradiación) hasta que la señal TL, dejó de ser función del tiempo entre templado e irradiación.

(vease diagrama 3)

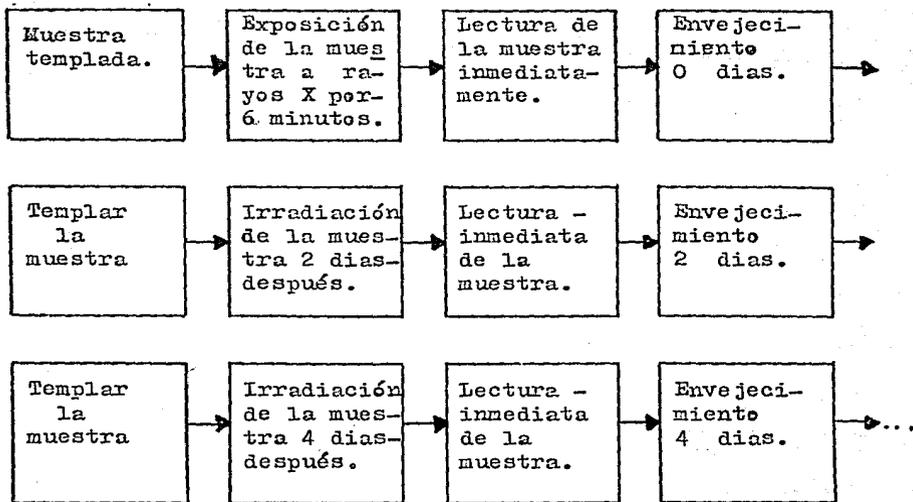


Diagrama 3 Experimento de Envejecimiento.

## E N V E J E C I M I E N T O

Los datos que se muestran en las tablas  $E_1$  y  $E_2$  son el resultado de dividir las intensidades de los picos 1, 2 y 3 entre el espesor de la muestra usada y normalizados con respecto al dato envejecimiento cero.

TABLA  $E_1$  NaCl:Mn<sup>2+</sup> 86.9 ppm.

ENVEJECIMIENTO (DIAS)	INTENSIDAD NORMALIZADA		
	PICO 1	PICO 2	PICO 3
0	1.000	1.0000	1.000
2	0.601	0.909	0.
4	0.342	0.544	0.872
6	0.272	0.511	0.834
12	0.137	0.	0.
21	0.030	0.070	0.221

Irradiación 6 minutos = 5.4R de exposición

TABLA  $E_2$  NaCl:Mn<sup>2+</sup> 86.9 ppm.

ENVEJECIMIENTO (DIAS)	INTENSIDAD NORMALIZADA		
	PICO 1	PICO 2	PICO 3
0	1.000	1.000	1.000
3	0.175	0.710	0.822
9	0.219	0.655	0.717
13	0.056	0.342	0.397
21	0.013	0.131	0.180

Irradiación 6. minutos = 5.4R de exposición.

Estos datos están representados en la gráfica  $E_2$ .

C A P I T U L O    I I I

ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### III. 1. ANALISIS DE RESULTADOS

Como puede observarse en las tablas C 1 y C 2, la TL es mayor para la muestra de mayor concentración, por otra parte en la curva de TL obtenida se observan 3 máximos ( ver- figura número 10 ) que corresponden a los denominados III, IV y V por F.J.López y Alvarez Rivas, estos picos son más confi- bles que los restantes puesto que son los de mayor temperatu- ra por lo que una de sus características es la de no ser - - afectados por cambios bruscos de factores ambientales o de - temperatura, por otra parte el pico V (pico 3 según nuestra - clasificación) posee un comportamiento bastante aceptable - - (es más estable, es el de mayor temperatura etc.) en compara- ción a los otros dos, es por esto que sugerimos sea el usado- al emplear el  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$  como dosímetro TL.

En cuanto a las curvas de calibración, como puede observarse- en la gráfica  $C_1$ , en exposiciones de hasta 9 roentgen (aproxí- madamente) parece existir una relación potencial entre esta - y la intensidad TL por esta razón se decidió graficar los - - datos en papel log-log obteniéndose la gráfica  $C_1$  a) que nos- muestra un segmento rectilíneo en un intervalo de exposiciones desde 2 a 9 roentgens, es necesario aclarar que la recta de - esta gráfica fué trazada en base a un ajuste por el método de mínimos cuadrados.

De acuerdo con las características que debe tener un buen- - material DTL mencionadas en la sección I.7, el rango de linea- lidad de respuesta TL de nuestro material resulta bastante - pequeño, cabe mencionar que el comportamiento de los 3 picos- es análogo.

Para la muestra con mayor concentración de manganeso,  $C_2$  los resultados son semejantes a los anteriores, sin embargo la señal termoluminiscente es más fuerte. Puede darse una explicación de este fenómeno considerando que las impurezas son trampas de intersticiales y por tanto su presencia permite que se establezcan más intersticiales, al calentar se liberan estos intersticiales y se recombinan con centros F emitiendo luz.

La gráfica  $C_2$  a) muestra la curva de calibración de la muestra  $C_2$  en papel log-log, las rectas se trazaron en base a un ajuste por el método de mínimos cuadrados y sin embargo la dispersión de los puntos es bastante notoria para los picos 1 (●) y 2 (▲), esto era de esperarse puesto que son picos de baja temperatura por lo que su respuesta se ve afectada notablemente por cambios en la temperatura ambiente. Resumiendo, el intervalo de linealidad de ambas muestras ( $C_1$  y  $C_2$ ) es pequeño, esto representa una desventaja con respecto a algunos de los fósforos dados en la tabla 2.

El pico más confiable resulta ser el tercero (■), su respuesta es estable, es el pico de más alta temperatura por lo que difícilmente se ve modificado por los cambios de temperatura ambientales.

Los resultados de la tabla  $D_1$  muestran que la intensidad de la señal TL a temperatura ambiente de los picos 1, 2 y 3 se desvanece conforme pasa el tiempo después de haber sido irradiada la muestra.

El pico 1 (●) desaparece casi completamente (el 95 %) en tan solo seis días, posteriormente la respuesta parece estabilizarse (por lo menos así permanece hasta los 21 días). La

curva del pico 2 ( $\blacktriangle$ ) tiene forma análoga a la del pico 1, - pero su desvanecimiento es menor, para 6 días, la señal TL - ha decaído en un 55 %, pero a partir de los 10 días de desvanecimiento, la señal comienza a estabilizarse, (en los próximos 11 días la señal solo decae en el 12 %) por lo que pensamos que este pico puede ser útil en la detección de la radiación X. El comportamiento del pico 3 ( $\blacksquare$ ), se muestra en la gráfica  $D_1$  es más estable que los 2 anteriores.

Inicialmente su decaimiento es de 40 % en los primeros 10 - días pero en los subsecuentes solo decae en un 10 %, por - estas razones, el pico 3 es el que nos puede proporcionar mejores resultados en relación a la dosis recibida por nuestro fósforo, puesto que es el más estable y el de mayor temperatura.

La gráfica  $D_2$  muestra los resultados sobre el desvanecimiento para la muestra  $D_2$  que contiene una mayor concentración de manganeso. La señal del pico 1 ( $\oplus$ ) se desvanece en un 98 % - durante los primeros 5 días después de haber sido irradiada - la muestra, posteriormente, la señal parece desaparecer, es - posible que los otros valores se deban a la dispersión de la medida. Los picos 2 ( $\blacktriangle$ ) y 3 ( $\blacksquare$ ) poseen un desvanecimiento - rápido durante los primeros días posteriormente a la irradiación, a los 13 existe un desvanecimiento del 85 % y del 72 % - respectivamente por lo que la estabilidad del  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$  no la podemos considerar buena, después de los 13 días la señal - - tiende a ser independiente del tiempo entre irradiación y - - lectura. Nuevamente cabe hacer notar que el pico de mayor temperatura (pico 3) es el menos inestable por lo que es el más - útil en caso de que nuestro fósforo sea utilizado como DTL.

Comparando los resultados de ambas muestras (poseen diferente concentración) se encuentra que los picos de las curvas  $D_1$  se inhiben en forma más lenta que el correspondiente de la curva  $D_2$  hasta un periodo de aproximadamente 17 días, posteriormente las curvas de la gráfica  $D_2$  se estabilizan, mientras que los de las curvas de la gráfica  $D_1$  tardan un poco más de tiempo en estabilizarse.

El desvanecimiento de la señal TL puede ser causado por la recombinación de defectes de poca estabilidad que se encuentran capturados en trampas de donde pueden liberarse fácilmente y liquidarse con sus defectos complementarios. Recordemos que a temperatura ambiente los defectes creados durante la irradiación son móviles, algunos de los cuales se mueven lentamente por lo que con el paso del tiempo pueden llegar al sitio donde están sus defectos complementarios y recombinarse emitiendo luz antes de que leamos nuestra muestra.

Envejecimiento. como se observa en la gráfica  $E_1$  las intensidades de los picos de TL cambia notablemente conforme se envejece la muestra, así pues, el pico 1 (⊙), a los 10 días ha disminuido en un 88%, el pico 2 (△) un 80%. El pico 3 (⊠) posee un comportamiento bastante extraño, este pico es el más intenso a los veintinueve días de envejecimiento. Por otra parte las señales de los tres picos se estabilizan en un periodo de doce días después de haber sido templados, por este concluimos que las muestras (al menos para esta concentración) a usarse como DTL deben templarse y guardarse doce días para después emplearse.

Para muestras con concentración de 86.9 ppm. Los resultados son análogos a los anteriores. La intensidad de la señal TL depende fuertemente del tiempo de envejecimiento, el pico 1 (●) se atenúa en un 85 % en los primeros cinco días de -- envejecida la muestra, a los veinte días casi a desaparecido, los picos 2 (▲) y 3 (■), decaen en forma menos lenta que el anterior, aunque también lo hacen rápidamente, sin embargo -- después de los trece días comienzan a estabilizarse conservándose un 25 % y un 35 % respectivamente vease gráfica E<sub>2</sub>.

El pico de mayor temperatura (pico 3) es el menos inestable y por tanto el más confiable. Esto nos permite concluir que es necesario dejar envejecer la muestra trece días, con este suceso será óptimo.

El comportamiento con el envejecimiento de ambas muestras 6.2 y 86.9 ppm. es análogo, difiriendo solamente en la intensidad de la señal TL siendo mayor en la de concentración mayor. -- Entre algunas posibles causas de la atenuación de la señal TL conforme aumenta el período entre el templado y la irradiación se encuentran los siguientes mecanismos: el templado de la muestra modifica marcadamente el estado de agregación de -- la impureza, pues el calentamiento de la muestra disuelve las fases precipitadas y agregados de impurezas, el enfriamiento brusco, mantiene congeladas a las impurezas por tiempos cortos por lo que al transcurrir éste, nuevamente se empiezan a -- formar agregados que son menos hábiles para capturar intersticiales que las impurezas dispersas (esto da lugar a una disminución en la intensidad de la señal TL). Sin embargo al formarse los agregados, que son más estables pues su formación --

resulta energéticamente favorable, el movimiento de las impu  
rezas se detiene. Este origina una respuesta de las trampas-  
para capturar intersticiales distinta al caso en que las - -  
impurezas están disueltas.

### III. C O N C L U S I O N E S

1° El fósforo  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$  posee una señal TL más intensa - cuando es mayor la concentración de manganeso, al menos así - ocurrió para las concentraciones que manejamos.

2° Los picos más confiables de la curva de brillantéz son los denominados III, IV y V por F.J. López y Alvarez-Rivas - (1, 2 y 3 por nosotros respectivamente) puesto que son los - que aparecen a mayor temperatura y por tanto los menos sensibles a cambios bruscos de ésta, sin embargo el pico 3 es el - que tiene un mejor comportamiento y por tanto sus resultados - son más confiables que los de los otros picos.

3° La curva de calibración posee un intervalo de linealidad para un rango de exposiciones comprendidas entre 1 y 9 - reentgen.

4° Es recomendable utilizar el  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$  como DTL siguiendo de las reglas:

a) La muestra debe templarse, dejarse envejecer a temperatura ambiente por espacio de diez días para después emplearse. Con esto se logra mejorar la reproducibilidad de los resultados.

Debe dejarse desvanecer un intervalo de tiempo análogo al anterior para que la estabilidad de la respuesta sea bastante buena.

b) Otra forma consiste en considerar las curvas de desvanecimiento y envejecimiento.

La exposición obtenida de la curva de calibración a partir de la lectura de TL deberá entonces incrementarse - -

corrigiendo los factores de decaimiento debidos al desvanecimiento y envejecimiento específicos que hubiera sufrido la muestra.

Por ejemplo: Si la muestra fué irradiada y leída 3 días después, la gráfica  $D_2$  indica que la intensidad del pico 3 deberá incrementarse en un 25% para luego leerse en la curva de calibración  $C_1$  para así obtener la exposición respectiva.

Si la muestra se templó y se guardó 5 días la gráfica  $E_2$  indica que la intensidad del pico 3 deberá incrementarse en un 26% para luego leerse en la curva de calibración  $C_2$  y así se obtendrá la exposición respectiva.

5° El  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$  utilizado como DTL posee las siguientes características: Eficiencia bastante buena, la señal TL se puede detectar fácilmente, sin embargo esta puede ser mejorada variando las concentraciones de manganeso de las muestras y eligiendo la más conveniente.

- Intervalo de linealidad bastante pequeño por lo que se requiere de una calibración muy cuidadosa.

- Reproducibilidad bastante buena teniendo en cuenta las reglas mencionadas anteriormente, la incertidumbre aproximada es,

Es estable ante la temperatura puesto que los picos seleccionados para calibrarlos se encuentran arriba de los  $100^\circ\text{C}$  en la curva de TL por lo que los cambios en el medio ambiente no deterioran significativamente a la señal.

- Su principal emisión se encuentra en los 595 nm., esto proporciona una gran ventaja puesto que a esta longitud

de onda los fotodetectores comerciales responden bien.

- No es resistente a factores ambientales tales como la humedad y la luz, sin embargo este no representa un problema serio porque puede encapsularse en teflón y guardarse en una caja en donde no entre la luz, pudiendo extraer de esta a oscuras.
- Una de sus principales ventajas es su bajo costo con respecto a otros DTL pues el  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$  es barato (comparado por ejemplo con el  $\text{LiF}$ ); además puede leerse en un equipo comercial.

6° Comparado con respecto a otros fósforos utilizados en dosimetría termoluminiscente:

- Posee una densidad análoga a la de estos (vease tabla No.2)
- Su emisión máxima esta en 5950 Å, es decir en el mismo rango en el cual se encuentran las emisiones de los otros fósforos (se encuentran entre 4000 y 6000 Å).
- La temperatura del pico principal de emisión es aproximadamente 100°C, sin embargo el más confiable está muy próximo a los 200°C (casi a igual temperatura donde se encuentra el principal pico de emisión del TLD-100).
- Presenta serias desventajas con respecto a la lista de fósforos presentados en la tabla 2 en cuanto a: intervalo de linealidad y su desvanecimiento, aunque esto último puede descontarse siguiendo las reglas de uso sugeridas al inicio de esta parte.

7° Para poder hacer una comparación más representativa de sus ventajas y desventajas sobre los dosímetros termoluminiscentes presentados en la tabla 2 es necesario preparar

una de nuestras muestras con dimensiones análogas a las del -  
TLD-100 comercial y medir su respuesta TL en un aparato - -  
comercial y/• usar cristal TLD-100 y medir su respuesta TL en  
el equipo empleado por nosotros.

G R A F I C A S .

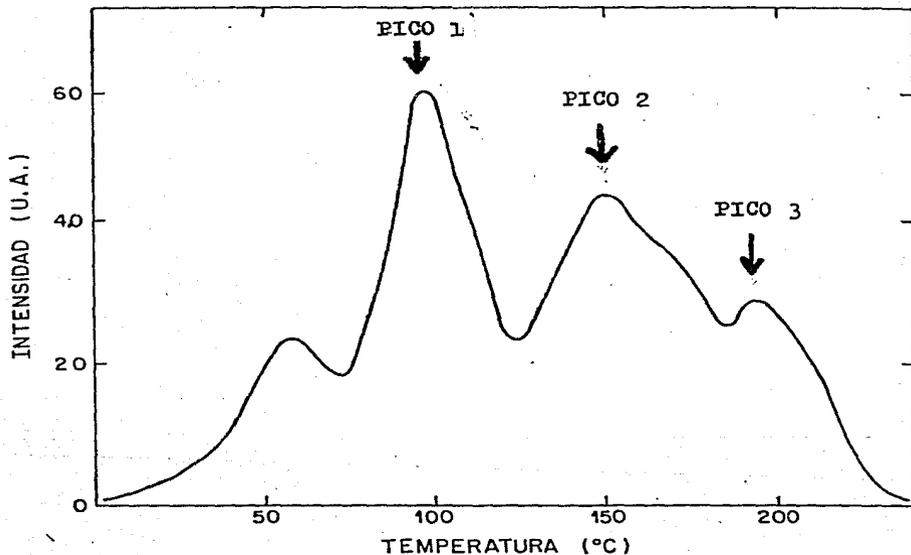
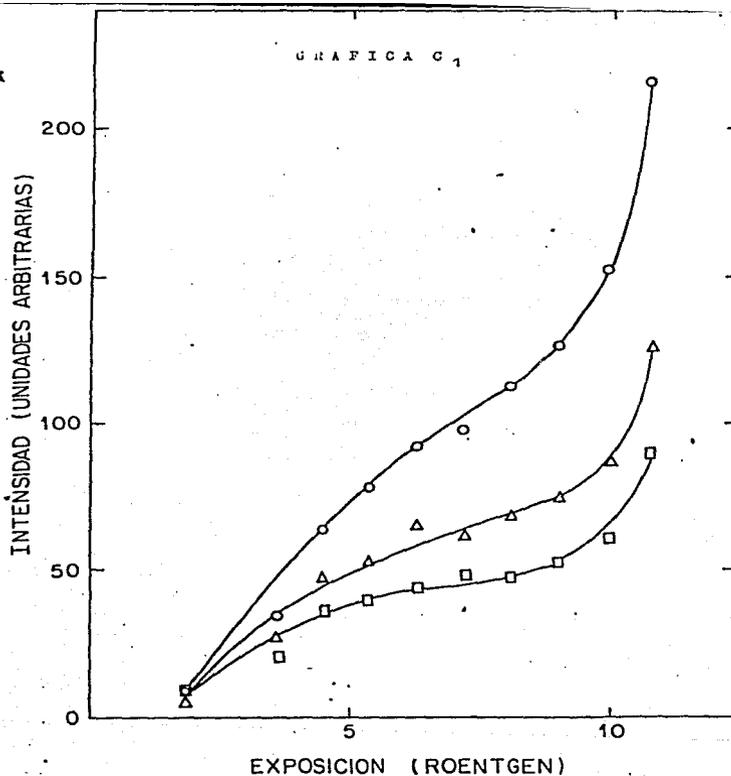


FIGURA (10) Curva típica de TL de una muestra de  $\text{NaCl}:\text{Mn}^{2+}$   
 Calentada por 30 minutos a  $580^\circ\text{C}$  y templada,  
 posteriormente.  
 Irradiada con rayos X durante 6 minutos bajo -  
 las condiciones 15 Kv 14mA.  
 La razón de calentamiento fué de  $51.2^\circ\text{C}/\text{min}$ .

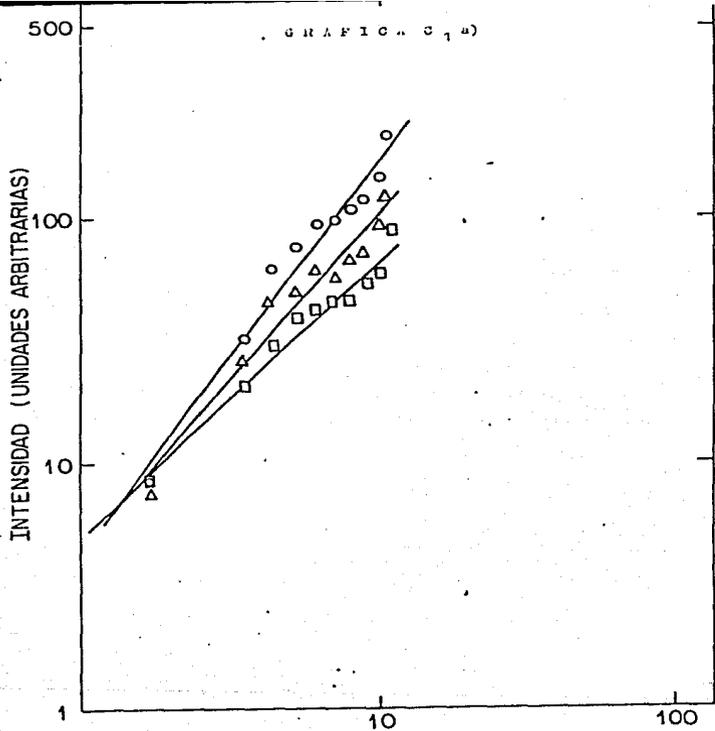


Gráfica C<sub>1</sub> Curvas de calibración de una muestra de NaCl:Mn<sup>2+</sup> irradiada con rayos X, a temperatura ambiente, - con una concentración de manganeso de 6.2 ppm. La razón de calentamiento fue 51.2 °C/min.

PICO 1 ●

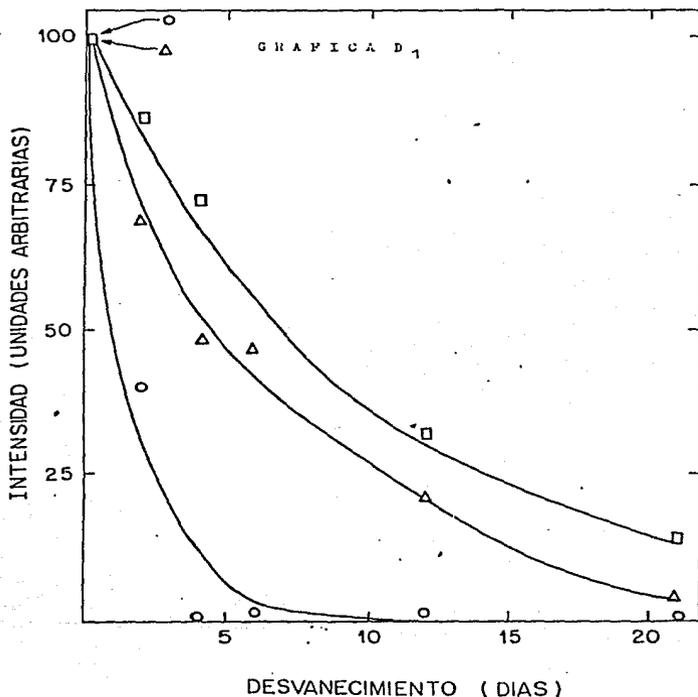
PICO 2 ▲

PICO 3 ■



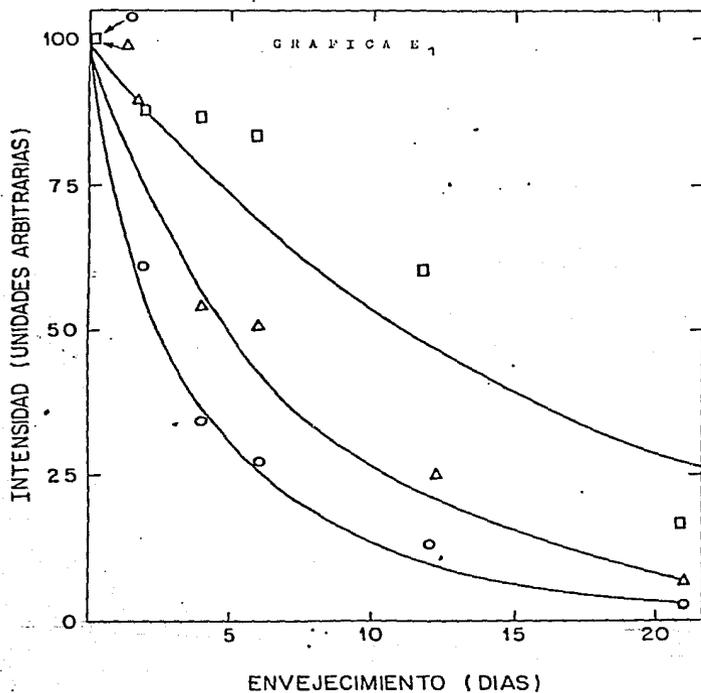
Gráfica C<sub>1</sub> a). Curva de calibración en coordenadas logarítmicas de una muestra de NaCl:Mn<sup>2+</sup> tratada con rayos X a temperatura ambiente y con una concentración de manganeso de 6.2 ppm. La razón de calentamiento fué 51.2 °C/min.

- PICO 1 ●
- PICO 2 ▲
- PICO 3 ■



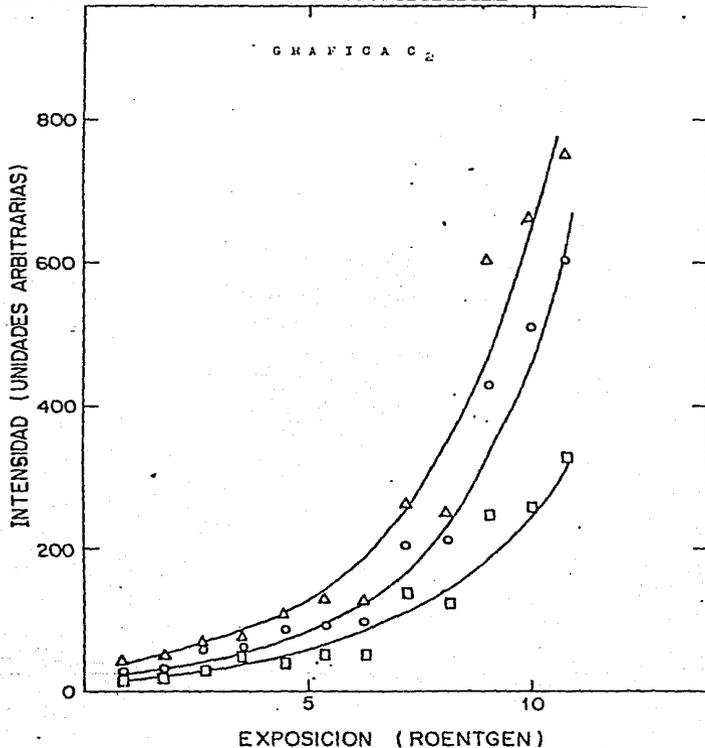
Gráfica D<sub>1</sub> Curvas de desvanecimiento de una muestra de - - NaCl:Mn<sup>2+</sup>, irradiada a temperatura ambiente con rayos X y una concentración de manganeso de 6.62 ppm.  
La razón de calentamiento fué 51.2 °C/min.

PICO 1 ●  
PICO 2 ▲  
PICO 3 ■



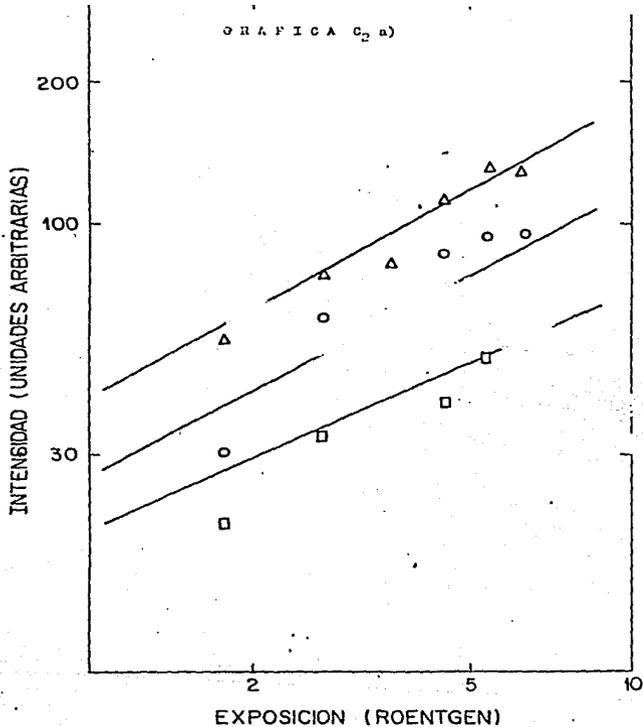
Gráfica E<sub>1</sub>: Curvas de envejecimiento de una muestra de NaCl:Mn<sup>2+</sup> irradiada con rayes X, a temperatura ambiente y una concentración de manganeso de 6.2 ppm. La razón de calentamiento fué 51.2 °C/min.

- PICO 1 ●
- PICO 2 ▲
- PICO 3 ■



Gráfica C<sub>2</sub> Curvas de calibración de una muestra de NaCl:Mn irradiada con rayos X, a temperatura ambiente, con una concentración de manganeso de 6.62 ppm. La razón de calentamiento fué 51.2 °C/min.

PICO 1 ●  
 PICO 2 ▲  
 PICO 3 ■

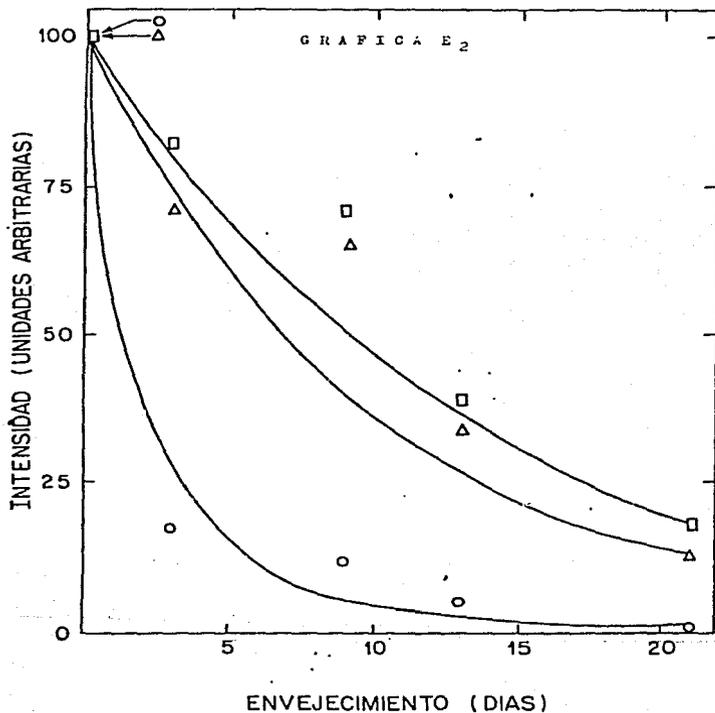


Gráfica C<sub>2</sub> a) Curvas de calibración en coordenadas logarítmicas de una muestra de NaCl:Mn<sup>2+</sup> irradiada con rayos X, a temperatura ambiente, con una concentración de Mn de 86.9 ppm. La razón de calentamiento fué 51.2 °C/min.

PICO 1 ●

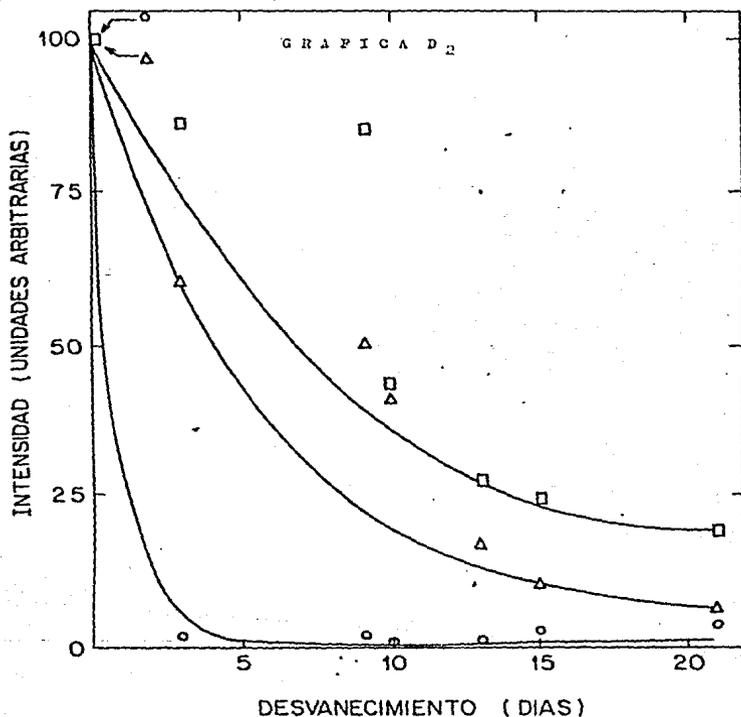
PICO 2 ▲

PICO 3 ■



Gráfica E<sub>2</sub> Curvas de envejecimiento de una muestra de - -  
 NaCl:Mn<sup>2+</sup> irradiada con rayos X, a temperatura  
 ambiente, con una concentración de manganeso -  
 86.9 ppm.  
 La razón de calentamiento fué 51.2 °C/min.

- PICO 1 ●
- PICO 2 ▲
- PICO 3 ■



Gráfica D<sub>2</sub> Curvas de desvanecimiento de una muestra de  $\text{NaCl:Mn}^{2+}$  irradiada con rayos X, a temperatura ambiente y con una concentración de manganeso de 86.9 ppm.  
La razón de calentamiento fué 51.2 °C/min.

- PICO 1 ●
- PICO 2 ▲
- PICO 3 ■

## R E F E R E N C I A S

- ( 1 ) Boletín informativo No. 39 I.M.P. México, D.F. marzo-  
de 1983 pp 26-29.
- ( 2 ) J.S. Strettan Ionizing Radiations. . . Pergamend Press  
LTD 1967 London P-103.
- ( 3 ) A. Sena. . . Unidades de Magnitudes Físicas y sus - -  
Dimensiones Ed. Mir. Moscú 282-3.
- ( 4 ) Cameron. . . Thermoluminescent Dosimetry University of  
Wiscensin 1968.
- ( 5 ) Azerin. . . El sistema internacional de sus unidades y  
sus aplicaciones en la industria nuclear Revista - -  
Ciencia y Desarrollo México pp 91-102 (1984).
- ( 6 ) F. Agulló López, J. López. . . Cryst. Latt. Defects Vol.-  
9, pp 227, (1982).
- ( 7 ) H. Veta, y Kende, . . . 3 Phys Soc Japan 26, 1000, (1969).
- ( 8 ) Comins J.D. y Carragher. . . J. Phys. 41 C 6, 166-9 - -  
(1980).
- ( 9 ) Mc Keever Radiation Protection Dosimetry Vol. 8. No.-  
1/2, p 3-23 (1984).
- (10) J. García. . . Tesis Doctoral Facultad de Ciencias - -  
U.N.A.M. México (1983).
- (11) N. Kristianpoller. . . Phys. Rev. Vol. 2 (1979).
- (12) Jiménez de Castro y Alvarez Rivas. . . Phys Rev. Vol.-  
19 No. 12 (1979).
- (13) Itoh. . . . . Sol St. Phys. Vol. 8 (1978).

- (14 ) K. Tanimura. . . .Phys. Letters. Vol. 50A No. 4 - -  
(1974).
- (15 ) A.K. Nehate, R.V. Joshi Radiation Effects, Vol. 62 -  
pp 101-106 (1982)
- (16 ) Rodriguez I. . .Desimetría Termoluminiscente. . . -  
México (1984).
- (17 ) F.J. López, F. Jaque y Agulló López J. Phys-Chem - -  
Solid State Vol. 38 pp 1101-1109 (1977).
- (18 ) F.J. López J.M. Cabrera y Agulló López J. Phys-Chem -  
Solid State Vol. I pp 1232-3 (1979).
- (19 ) Delgado. L. y Alvarez Rivas J. Phys-Chem Solid State-  
Phys Vol. 15 pp 1591-600 (1982).
- (20 ) López, F.J.J. Jaque and Agulló López J. Phys-Chem -  
Solid State Vol. 41 pp 681-2 (1980).
- (21 ) Ausin. and Alvarez Rivas Phys. C. Vol. 5 p 82 (1972).