

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA  
DIVISION DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA

---

---

DEPARTAMENTO DE FISICA

**"ESTUDIO DE LA TERMOLUMINISCENCIA DEL  
 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Y DEL ZrO<sub>2</sub>:TR Y SU APLICACION  
A LA DOSIMETRIA DE LA RADIACION  
NO IONIZANTE"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN FISICA  
P R E S E N T A:  
TEODORO RIVERA MONTALVO**

MEXICO D.F.

DICIEMBRE 1997

---

**A mi madre:**

En su memoria, con cariño y abnegación

**A la familia Cruz Mena:**

Mi familia, como recompensa de su  
buen ejemplo y apoyo durante mi  
formacion profesional

---

**ESTUDIO DE LA TERMOLUMINISCENCIA DEL  
 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Y DEL ZrO<sub>2</sub>:TR Y SU APLICACION  
A LA DOSIMETRIA DE LA RADIACION  
NO IONIZANTE**

---

<b>INDICE</b>	<b>Página</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>vi</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>CONCEPTOS DE DOSIMETRIA</b>	
1.1 Introducción	12
1.2 Fluorescencia y fosfrescencia	13
1.3 Luminiscencia en sólidos	13
1.4 Termoluminiscencia	15
1.5 Dosimetría TL	22
<b>CAPITULO II</b>	
<b>RADIACIONES NO IONIZANTES</b>	
2.1 Introducción	33
2.2 Descripción física	33
2.3 Efectos biológicos de las RNI	38
2.3.1 Efectos estocásticos	40
2.3.2 Efectos determinísticos	40
2.3.3 Efectos biológicos en el hombre	41
2.3.3.1 Efectos biológicos en el cuerpo	42
2.3.3.2 Efectos biológicos en el ojo	45
2.4 Efectos tardíos	48
2.5 Fotosensibilidad	49
2.6 Normas y procedimientos	50

### **CAPITULO III**

#### **MAGNITUDES Y UNIDADES USADAS EN DOSIMETRIA DE LAS RNI**

3.1 Introducción	54
3.2 Dosimetría de las radiaciones no-ionizantes	55
3.3 Magnitudes y unidades de dosimetría de RNI	56
3.4 DTL de UV	61
3.5 Límites de exposición de RNI	64

### **CAPITULO IV**

#### **METODOS PARA DETERMINAR LOS PARAMETROS DE LAS TRAMPAS**

4.1 Introducción	72
4.2 Deconvolución	73

### **CAPITULO V**

#### **CARACTERISTICAS DOSIMETRICAS DE UN MATERIAL TL PARA RNI**

5.1 Introducción	80
5.2 Curva TL	80
5.3 Sensibilidad	80
5.4 Respuesta en función de la longitud de onda	82
5.5 Respuesta en función de la dosis	83
5.6 Desvanecimiento de la información (fading)	83
5.7 Reproducibilidad	84

## **CAPITULO VI**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

6.1 Introducción	90
6.2 Materiales	90
6.2.1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	91
6.2.1.1 Respuesta TL ante microondas	92
6.2.1.2 Respuesta TL ante UV/VIS	93
6.2.2 propiedades dosimétricas de ZrO <sub>2</sub>	97
6.3 Espectro de excitación	101
6.4 Espectro de absorción	101
6.5 Instrumentación	101
6.6 Orden cinética	103

## **CAPITULO VII**

<b>RESULTADOS</b>	105
<b>CONCLUSIONES</b>	118
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	119

## **INTRODUCCION**

---

## INTRODUCCION

A pesar de que la radiación es un factor ambiental, que ha estado presente en la tierra desde antes de que apareciera la vida, los efectos que causa a los seres vivos, se conocieron solo hasta que el hombre produjo fuentes radiactivas, con las que se expusieron individuos a dosis altas las cuales indujeron efectos somáticos detectables. Desde su aparición sobre la tierra el hombre ha estado expuesto a diversos tipos de radiación no ionizante teniendo especial interés la luz ultravioleta (UV) por su relativamente alta energía comparada con los otros tipos de radiación incluidos en este grupo.

El sol es la fuente natural y más importante de la luz UV debido a la alta temperatura de su superficie y a su gran tamaño, aunque existen una gran cantidad de fuentes producidas por el hombre junto con otros tipos de radiaciones no ionizantes. Esto ocasiona que toda la gente esté, expuesta en mayor o menor grado a estas radiaciones.

La intensidad de la luz UV que llega a la tierra es tan alta que probablemente sería letal para la mayoría de los seres vivientes en la superficie de la tierra si no estuvieran protegidos por la atmósfera. En la parte superior de la atmósfera la capa de ozono representa un factor muy importante, ya que reduce significativamente la longitud de onda de la luz UV. La longitud de la trayectoria recorrida por la luz UV al atravesar la atmósfera, determina la intensidad de la radiación que llega a la superficie de la tierra. Por consiguiente, ésta depende de la latitud geográfica, de la altitud sobre el nivel del mar y de la época del año. La dispersión y absorción por polvo, humo y lluvia también son importantes.

La luz UV proveniente del sol con longitud de onda inferior a 297 nm, prácticamente no llega a la superficie de la tierra. Por consiguiente casi no hay UV de longitud de onda por debajo de los 300 nm a nivel del mar<sup>(1)</sup>. Sin embargo, si el espesor de la capa de ozono disminuyera, se esperaría una disminución apreciable en la absorción de las bandas críticas del UV y un considerable aumento en los efectos biológicos producidos<sup>(2)</sup>. Además es bien sabido que la luz UV puede iniciar



reacciones fotoquímicas y que algunas de estas reacciones tienen lugar en la piel. Sin embargo, aún no se ha podido cuantificar que cantidad de luz UV afecta al hombre; por el contrario, en algunos casos se ha usado la luz UV artificial en el interior de minas y cuevas como un suplemento para disminuir la incidencia de enfermedades infecciosas, aprovechando sus propiedades germicidas.

Se ha demostrado que altas dosis de luz UV producen efectos agudos en la piel y en los ojos y que dosis más bajas pueden inducir cambios que resultarán en efectos tardíos tales como elastosis, queratosis y diversos cánceres de la piel.

Ante esta preocupación el hombre se ha visto en la necesidad de encontrar un dispositivo o equipo que pueda calificar y cuantificar la cantidad de luz UV que recibe una persona durante una exposición en el exterior en un tiempo determinado. Pero la mayoría del equipo disponible en la actualidad para la cuantificación de la dosis en relación con la protección, es incómodo, delicado y no está bien adaptado para sus usos en el campo.

Desde el punto de vista de la normatividad, es deseable no sólo poder hacer mediciones de la cantidad de radiación emitida por una fuente, sino también ser capaces de registrar, por algunas formas de dosimetría personal, las dosis recibidas por las personas expuestas. Por tal motivo han surgido comisiones reguladoras de la industria nuclear y radiológica, así mismo de esas comisiones han surgido otras que se dedican al estudio de la normatividad de las radiaciones no ionizantes. Estas comisiones exigen medidas cada vez más rigurosas en lo que a protección radiológica se refiere.

Ante esta problemática la comunidad científica ha emprendido una carrera tecnológica para desarrollar y perfeccionar las diversas técnicas utilizadas en dosimetría, cuyos objetivos principales han sido encontrar un método para medir la cantidad de radiación, tal que sea sensible, exacto, preciso, accesible económicamente y de fácil manejo.

Probablemente desde épocas prehistóricas el hombre de las cavernas ya haya observado la emisión de la luz al calentar ciertos

cristales naturales en la obscuridad efecto que seguramente conocieron también los alquimistas de la Edad Media. Este fenómeno de luminiscencia térmicamente estimulada, al que ahora llamamos erróneamente termoluminiscencia (TL), es la base de uno de los más importantes métodos modernos de dosimetría de la radiación ionizante y no ionizante. La dosimetría termoluminiscente (DTL), es uno de los métodos mas eficaces para medir la cantidad de radiación recibida en un momento dado en un intervalo de tiempo largo. Los dosímetros TL son sólidos cristalinos que después de ser expuestos a la radiación proporcionan información acerca de la energía depositada, por medio del mecanismo de termoluminiscencia (TL).

Uno de los primeros usos que se dieron a la termoluminiscencia (TL) fue precisamente para la medición de la luz UV ya que Wiedeman estudió desde de 1895, el efecto de la luz UV sobre la TL del  $\text{CaSO}_4:\text{Mn}^{(3)}$ . Este material recibió atención subsecuente como detector de luz UV en la región del vacío (100 - 190 nm).

El uso de diferentes DTL para el monitoreo de la radiación ambiental ha sido estudiado por varios autores<sup>(4,5,6,7)</sup> que han estudiado el efecto de la respuesta TL cercana a la luz UV tales como la luz del sol que llega a la superficie de la tierra debido a la alta sensibilidad de la piel humana a luz de longitud de onda de 302 nm.

En virtud de que resulta más práctico tener un dosímetro con gran sensibilidad intrínseca, algunos autores<sup>(8)</sup> han estudiado la técnica de sensibilización en cristales de  $\text{CaF}_2:\text{Dy}$  (TLD-200).

La sensibilidad intrínseca es una función del tratamiento térmico; por lo tanto, si se requiere usar estos dosímetros para medir la luz UV, se requiere obtener las curvas de calibración en función de la sensibilización. Esto permite también tener dosímetros con diferente sensibilidad, solamente cambiando el tratamiento de sensibilización; el efecto de sensibilización es difícil de explicar, especialmente porque se ha observado que otros materiales como el LiF, BeO y el  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  tratados con el mismo procedimiento no muestran este comportamiento. Por lo tanto, es de mucho interés lograr el desarrollo de un dosímetro personal termoluminiscente (DTL) para luz UV, basado en la respuesta

intrínseca de un material TL, especialmente ahora, que se están estudiando nuevos materiales TL altamente sensibles a la luz UV como es el caso promisorio del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}^{(9)}$ .

Otros trabajos han enfocado su interés en la respuesta del  $\text{ZrO}_2$  exponiéndolo a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético<sup>(10)</sup>.

El objeto de nuestro estudio es caracterizar las propiedades dosimétricas TL del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dopado con carbono y del  $\text{ZrO}_2$  dopado con europio y con terbio, en el intervalo de 190 - 900 nm y principalmente en la región actínica debido a que en esta región tiene su más alta sensibilidad la piel humana (302 nm) y las enzimas (344 nm) y de esta manera contribuir con la sociedad en la prevención de sobreexposición a los rayos solares y de fuentes artificiales de las cuales en la actualidad se ignora el riesgo que implican para la población humana.

La tesis se divide en dos partes; la primera está dedicada a repasar los aspectos teóricos relacionados con el fenómeno de la termoluminiscencia y la dosimetría de las radiaciones no ionizantes. Esta parte consta de 5 capítulos:

En el capítulo I se hace énfasis acerca del fenómeno de la luminiscencia haciendo distinción entre la fluorescencia y la fosforescencia. Al mismo tiempo se explica el fenómeno de la termoluminiscencia.

En el capítulo II tiene el enfoque a la teoría de las radiaciones no ionizantes en el que se desarrolla un análisis teórico acerca de los efectos biológicos y dosimetría de las radiaciones no ionizantes.

En el capítulo III se analizan las normas y condiciones límites de exposición para las radiaciones no ionizantes.

En el capítulo IV se estudian los diferentes métodos para la determinación de los parámetros TL. Para concluir esta parte en el capítulo V se analizan las características generales que debe tener un DTL para la dosimetría de las RNI.

La segunda parte el estudio consta de 2 capítulos:

En el capítulo VI se desarrolla el trabajo experimental, en el que se exponen los materiales, las fuentes y los procedimientos necesarios para llevar a cabo el estudio.

En el capítulo VII se reportan y analizan los resultados obtenidos durante el presente estudio de caracterizar los materiales, también se reportan las conclusiones pertinentes al trabajo. Para finalizar, el capítulo y todo el trabajo se reporta la bibliografía utilizada durante la realización de este trabajo.

## **CAPITULO I**

### **CONCEPTO DE LUMINISCENCIA**

---

## INTRODUCCION

La existencia de defectos en la red cristalina de un sólido es importante para que se produzca el fenómeno de luminiscencia cuando el cristal es expuesto a la radiación, en el que se producen electrones libres o agujeros. Estos portadores de carga o entes móviles migran por el cristal hasta quedar atrapados en determinadas configuraciones electrónicas y cuando estas configuraciones son desexcitadas se emite un fotón de luz conocida como luminiscencia.

El fenómeno de termoluminiscencia (TL) consiste en la emisión de luz al calentar, por debajo de su temperatura de incandescencia, una sustancia sólida previamente expuesta a un agente excitante tal como los rayos-X, partículas  $\alpha$  o  $\beta$ , radiaciones  $\gamma$  o luz ultravioleta. Estas últimas, aunque son radiaciones, de baja energía también logran ionizar y excitar el material en el que inciden.

### Luminiscencia

La luminiscencia se define como la emisión de la luz por un cuerpo, independiente de la radiación térmica, sin variar la temperatura y de duración considerablemente mayor para los periodos de radiación en la banda óptica del espectro.

Esta radiación puede ser debida al bombardeo de la sustancia con electrones, rayos-X, rayos gamma u otras partículas cargadas<sup>(11)</sup>.

La luminiscencia se presenta en una gran variedad de materiales tales como: cristales inorgánicos, vidrios, cerámicas, compuestos orgánicos (polietileno y teflón), así como en ciertos materiales bioquímicos y biológicos. Los materiales que presentan este fenómeno pueden dividirse en dos grandes grupos: materiales inorgánicos y materiales orgánicos.

En los primeros la luminiscencia se debe principalmente a la producción de electrones libres y agujeros, mientras que en los orgánicos a la formación de radicales libres.

En algunos casos se emite luz mientras se mantiene la excitación, fenómeno que se conoce como fluorescencia y en otros la luz persiste cuando se elimina la excitación, fenómeno al que se le da el nombre de fosforescencia.

### **Fluorescencia**

Una molécula electrónicamente puede permanecer un promedio de  $10^{-8}$ s en su estado excitado; de no presentar colisiones con otras moléculas vuelve a su estado fundamental con la emisión de un fotón de longitud de onda mas grande que la de la radiación incidente. Cuando la radiación que se absorbe y la que se emite tienen la misma longitud de onda se dice que se presenta fluorescencia resonante.

### **Fosforescencia**

En este proceso se presenta excitación electrónica de la misma forma que en la fluorescencia, solamente que el regreso al estado fundamental no es tan rápido como en el primer caso. El regreso de la molécula a su estado base puede llevarse a cabo en el tiempo comprendido entre  $10^{-2}$  y 100 s.

La explicación a este retraso es debida a la existencia de estados excitados metaestables, cuyo regreso al estado base se ve impedido por algunas causas como: la temperatura a la cual el material es examinado, la naturaleza del agente excitante y la facilidad de saturación del material. Para que se lleve a cabo la transición del estado metaestable al fundamental se puede estimular mediante la aplicación de una excitación complementaria, por ejemplo térmica.

### **Luminiscencia en sólidos**

La existencia de defectos en la red cristalina de un sólido es importante para que se produzca el fenómeno de luminiscencia cuando el cristal es expuesto a un agente excitante tal como las radiaciones, ionizantes o no ionizantes.

En un sólido cristalino perfecto los átomos ocupan posiciones ordenadas en una estructura reticular periódica, por lo que la existencia de cualquier alteración en una estructura constituye un defecto.

Entre los diversos tipos de imperfecciones que pueden presentarse en un cristal están los defectos puntuales que son anomalías localizadas en ciertas regiones del mismo y con un tamaño comparable al de los iones de la red.

La vacancia es un defecto puntual producido por la ausencia de un ion en una posición normalmente ocupada en la red cristalina. Los iones o átomos intersticiales son átomos que ocupan las posiciones de la red que normalmente corresponden a átomos desplazados de su posición normal en la estructura o bien átomos de impurezas.

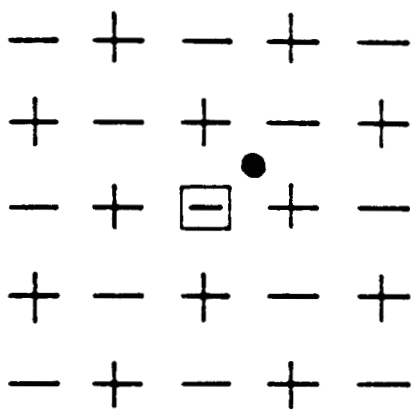
Cuando un sólido cristalino es expuesto a la acción de un agente excitante, como las radiaciones ionizantes o no ionizantes de baja energía (UV), se producen electrones libres y consecuentemente agujeros. Estos portadores de carga o entes móviles migran por la red hasta quedar atrapados en las imperfecciones antes mencionadas dando lugar a la formación de centros de color.

### **Centros de color**

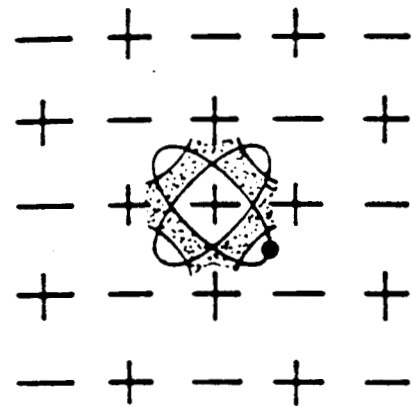
Se le da el nombre de centros de color a determinadas configuraciones electrónicas originadas por defectos de la red cristalina, cuyos niveles de energía producen bandas de absorción óptica en longitudes de onda a las que el cristal es normalmente transparente. La posibilidad de absorber luz hace que el cristal se coloree por lo que a estas configuraciones se les llama centros de color. La figura1 muestra algunos de los centros de color más comunes.

La desexcitación de un centro de color puede recibir nombres particulares de acuerdo al tipo de energía que se proporciona a los centros luminiscentes para desexcitarlos. Si la energía suministrada es por medio de radiación de frecuencia óptica, el fenómeno se llama radiofotoluminiscencia (RFL) y si la desexcitación se logra con energía térmica, se le conoce como termoluminiscencia (TL).

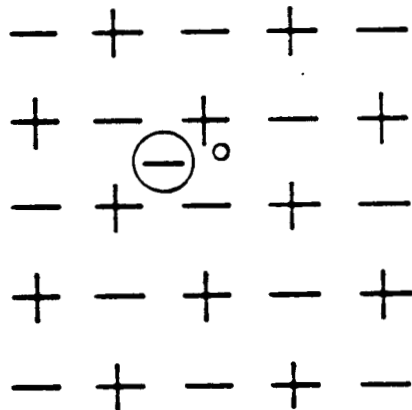




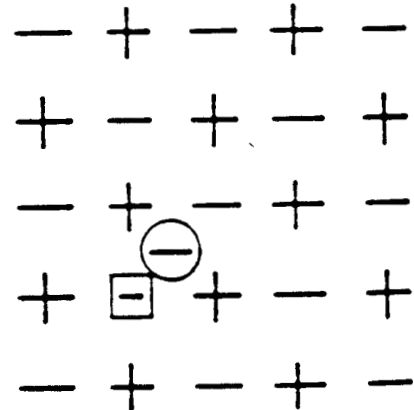
(a)



(b)



(c)



(d)

- |            |                           |                      |
|------------|---------------------------|----------------------|
| ● ELECTRON | □ - VACANCIA DE UN ANION  | ⊖ ANION INTERSTICAL  |
| ○ AGUJERO  | □ + VACANCIA DE UN CATION | ⊕ CATION INTERSTICAL |

Figura 1. Centros de color más comunes

## **Fenómeno de termoluminiscencia**

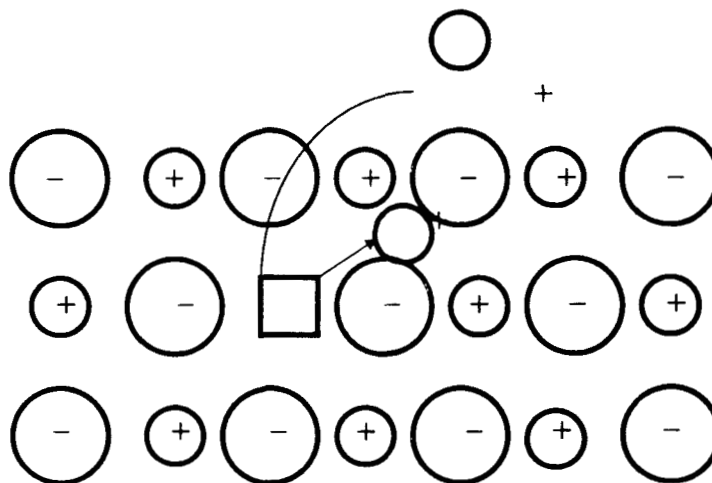
El fenómeno de termoluminiscencia consiste en que al calentar una substancia que ha sido expuesta previamente a la radiación ionizante, ésta tiene la propiedad de emitir luz visible, o sea una emisión de fotones en la región visible, si se eleva su temperatura a un valor suficiente por debajo de su temperatura de incandescencia. El nombre correcto de este fenómeno es el de radioluminiscencia térmicamente estimulada, pero por razones históricas se le llama radiotermoluminiscencia o simplemente termoluminiscencia (TL).

Cuando la radiación incidente posee la energía suficiente para interactuar con los electrones del material, de tal forma que la energía impartida a aquellos es la necesaria para que sean transferidos de su estado electrónico base a otro más energético, puede suceder que los electrones regresen inmediatamente a su estado fundamental o permanezcan en las trampas del cristal hasta que térmicamente se les proporcione la energía necesaria para ser liberados, con la consiguiente emisión de luz.

Aunque el fenómeno TL aún no se ha explicado a la perfección (se conoce desde 1663), el fundamento básico es cualitativamente bien entendido debido a la gran cantidad de modelos y estudios experimentales por medio de los cuales se ha comprobado que existe una gran variedad de defectos estructurales los cuales influyen de manera notoria en las propiedades TL.

Entre los defectos puntuales principales, los del tipo Shottky y Frenkel (figura 2) tienen gran importancia para las consideraciones cualitativas en la luminiscencia así como también es importante considerar impurezas, es decir átomos extraños a la red cristalina (que generalmente son introducidos artificialmente en la red) que pudieran provocar alteraciones estructurales en ellas. Este es precisamente el caso del óxido de aluminio activado con carbono, y del óxido de zirconio activado con tierras raras ambos sujetos de estudio en este trabajo; la importancia de considerar las impurezas radica en el hecho de afectar eléctricamente y de modo local el lugar que estas ocupan en la red

cristalina y así contribuir en gran parte al comportamiento del material durante y después de la irradiación.



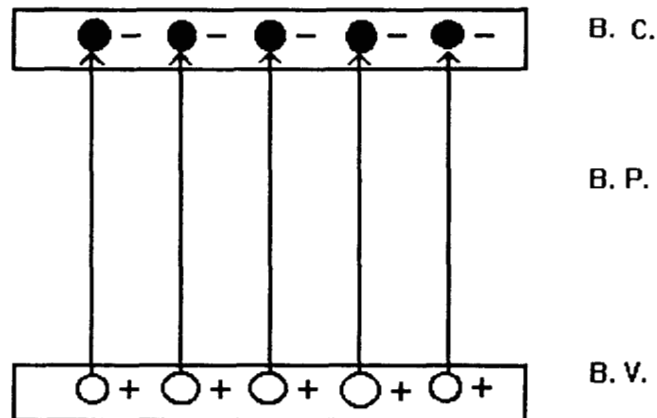
*Figura 2. Defectos Schottky y Frenkel*

Todos los sólidos cristalinos contienen imperfecciones estructurales de diverso tipo, las cuales constituyen las trampas donde son atrapados los electrones y los huecos que han sido liberados por el paso de la radiación. Algunas clases de posibles trampas son las siguientes:

- a) Imperfecciones y vacancias en la estructura cristalina producidas al tiempo que el cristal es formado o creadas luego por presión mecánica o tratamiento térmico.
- b) Distorsiones producidas por iones de impurezas de pequeño o gran tamaño que comprimen la estructura del cristal.

Todos los defectos pueden convertirse en centros de color localizados, de carga positiva o negativa, capaces de atraer carga de signo contrario, constituyéndose en centros de recombinación potenciales para los electrones y los huecos que son liberados al momento de la excitación.

Una manera de explicar el fenómeno TL es utilizando un modelo de bandas de un sólido con respecto a sus niveles de energía como el que se describe en la figura 3. Este modelo supone una banda de valencia (BV) donde se encuentran los electrones antes de ser excitados; una banda de conducción (BC) a donde pasan los electrones al ser excitados y permanecen en movimiento hasta recombinarse o ser capturados en un nivel energético metaestable en la banda prohibida (BP) la que contiene los estados de energía excitados (estados metaestables).



*Figura 3. Producción de entes móviles o portadores de carga en la irradiación de un cristal*

Si después de la irradiación, y cuando cualquier emisión de luz ha cesado, se eleva la temperatura del cristal en cuestión, la probabilidad de que un electrón abandone el estado metaestable aumenta considerablemente.

Como puede verse en la figura 4 los electrones localizados en la BV reciben de la radiación la energía necesaria para pasar a la BC.

Un gran número de los electrones liberados pueden regresar a un estado fundamental con la emisión o no de luz; así como otro tanto puede ser capturado en el nivel de donador D con el correspondiente hueco al nivel aceptor A. Los niveles D-A son simplemente estados metaestables asociados con defectos del cristal (incluyendo impurezas); cuando el

cristal es calentado, el electrón, el hueco o ambos según sea atrapado, uno u otro o ambos; con más o menos energía serán liberados térmicamente y la temperatura aplicada será una medida de la energía de desactivación térmica necesaria para que el electrón sea liberado. El portador de carga liberado puede recombinarse con su parte opuesta todavía atrapada emitiendo TL como se muestra en b y c de la figura 4; puede suceder que también los electrones y los huecos sean liberados más o menos simultáneamente y se recombinen en un sitio completamente nuevo d de la figura 4 llamado centro de luminiscencia o de recombinación, en la banda prohibida.

En todos los modelos que tratan de explicar el fenómeno TL se acepta la existencia de tres entes operativos para describirlos, estos son:

- Ente móvil o portador de carga (agujero o electrón)
- Centro luminiscente o centro de recombinación
- Trampas

#### **Agujero o electrón**

El proceso de formación del ente móvil (electrón o agujero se puede describir de la siguiente forma:

La interacción de la radiación ionizante con el sólido, proporciona la energía suficiente a los electrones para elevarlos de la BV a la BC dejando a los correspondientes agujeros en la BV.

El ente móvil así producido, viaja por el cristal hasta que se recombina o es atrapado en niveles metaestables que existen en la banda prohibida.

#### **Centros luminiscentes**

Un centro constituido por un electrón atrapado en una vacancia de un ion negativo se le llama centro F o centro de color, porque absorbe la luz y hace que el cristal tome una coloración característica. Se puede evidenciar la presencia de este tipo de centros, estudiando el espectro de absorción óptica (mediante la presencia de la banda de absorción F), o

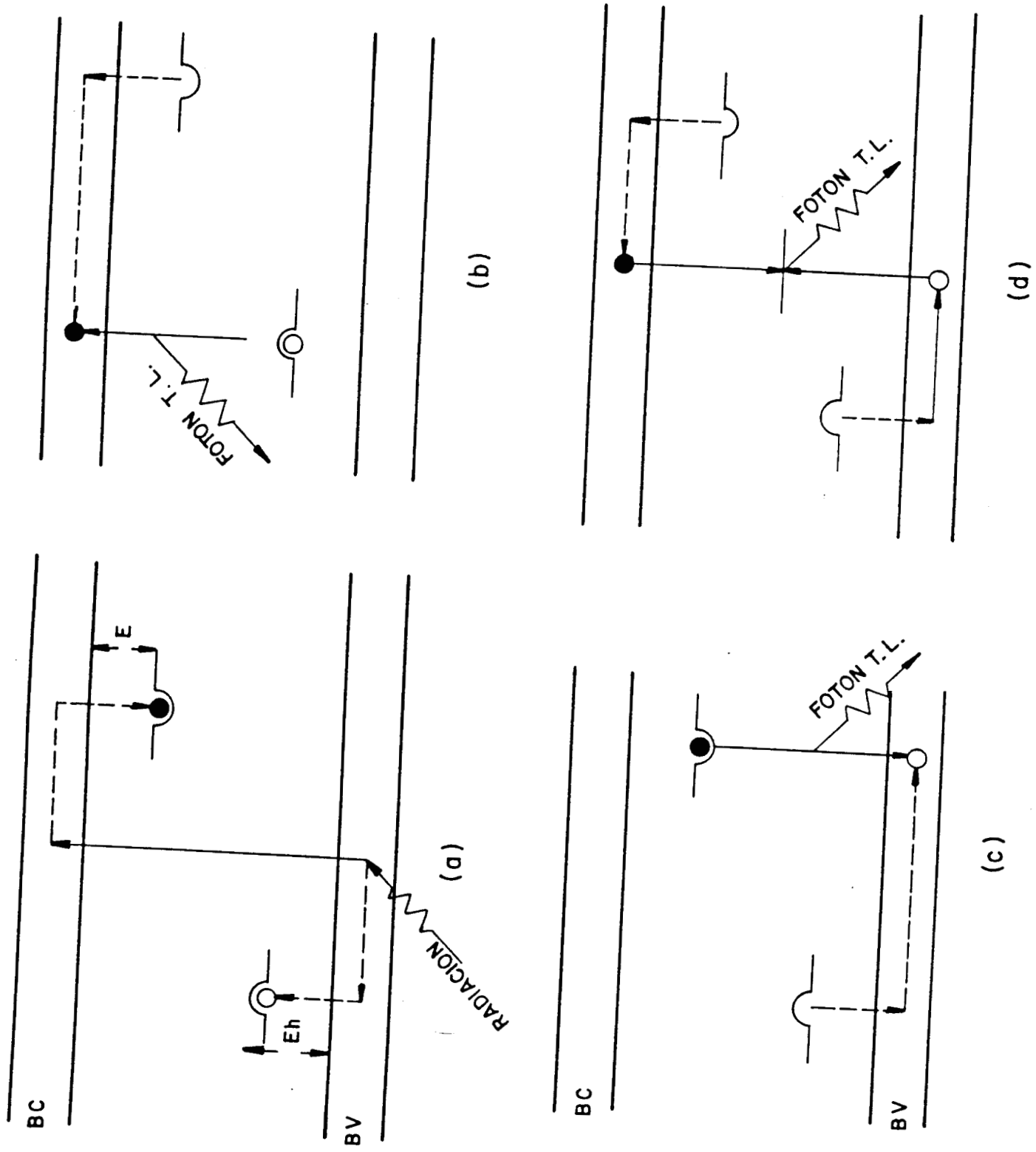


Figura 4. Centro luminiscente

- a) Exposición del cristal a la radiación
- b) , c) y d) Calentamiento del cristal previamente irradiado

por medio de resonancia paramagnética electrónica (RPE). Por analogía con el centro F, se le llama centro  $V_F$ , a aquel constituido por un agujero situado en lugar de una vacancia de un ion positivo. Estos centros de color se pueden agrupar para formar agregados de dos, tres o cuatro centros dando origen a un centro M, R o N respectivamente. La figura 5 muestra algunos centros derivados del centro F.

El fenómeno de creación de centros de color se puede provocar también induciendo estados metaestables, mediante la incorporación de impurezas a la estructura de la red cristalina. Con lo que se crean estados de energía suplementarios en la BP, los cuales son susceptibles de jugar el papel de trampas.

### **Trampas**

Estas imperfecciones pueden ser creadas durante el crecimiento del cristal o por medio de una irradiación con algún tipo de radiación. Estos defectos pueden estar constituidos por la ausencia de iones de uno u de otro signo llamada vacancia o por iones intersticiales; es decir, iones de uno o de otro signo que, por razones diversas, han sido desplazados de su posición normal en la red cristalina, dejando la correspondiente vacancia y quedando inmovilizados.

El hecho de que los defectos perturben el diagrama de energía del cristal hacen que se creen localmente niveles de energía metaestables permitidos en la BP. Si un ente móvil positivo o negativo pasa por la proximidad de tal centro; puede ser capturado por éste y, de acuerdo a la profundidad de la trampa, puede ser retenido dentro de ésta.

### **Espectros de emisión, excitación y absorción fluorescente**

El hecho de que la luz emitida corresponda a fotones de diferentes energías da lugar a un registro de su intensidad en función de la longitud de onda de la misma, que se conoce como espectro de emisión TL, éste también puede presentar varios puntos de intensidad máxima, a los cuales se les llama picos de emisión.

La obtención del espectro de excitación tiene como propósito determinar las bandas de emisión fluorescente en un determinado material,

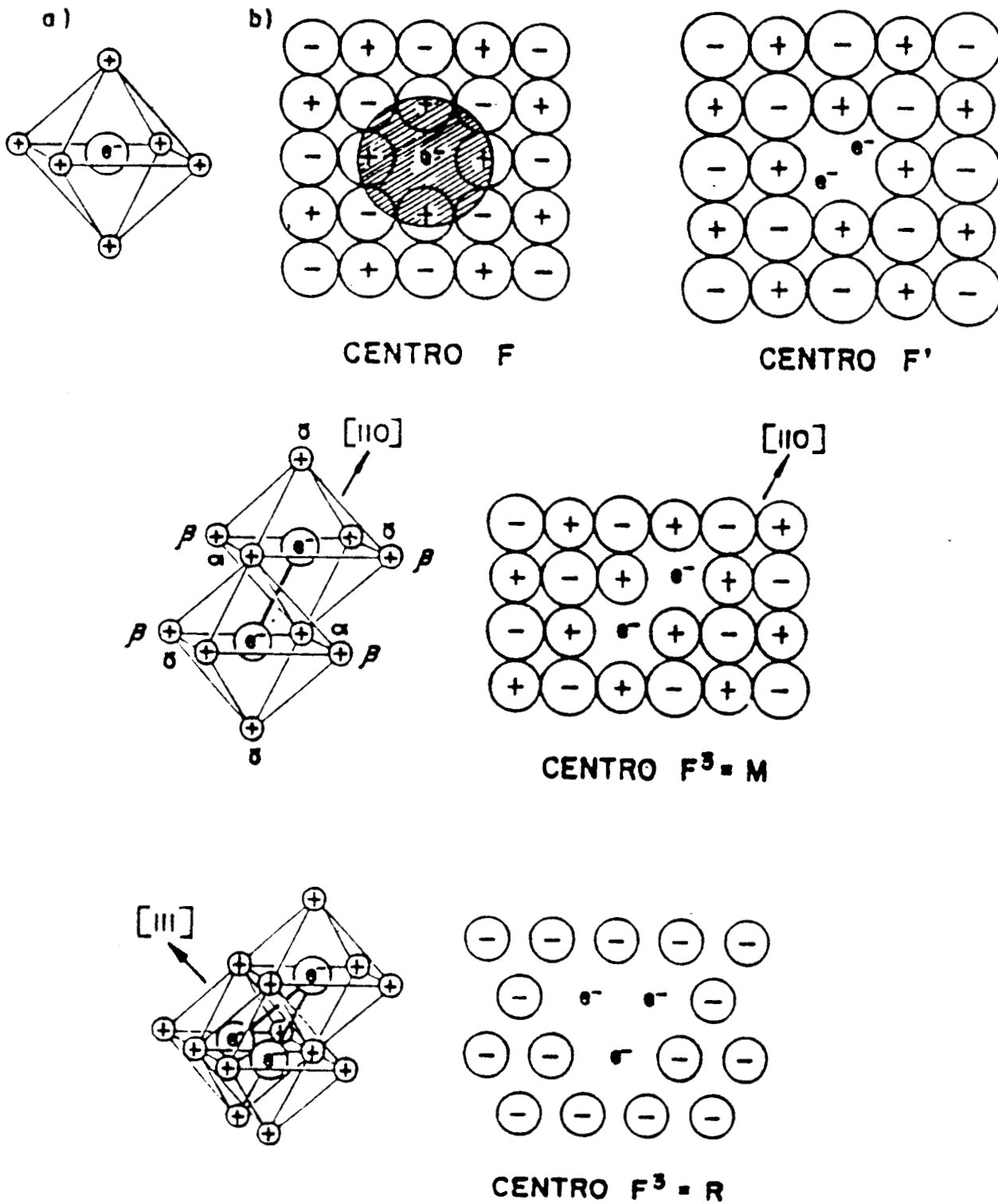


Figura 5. Estructura atómica de algunos centros derivados del centro F



La obtención del espectro de excitación tiene como propósito determinar las bandas de emisión fluorescente en un determinado material, para lo cual se hace incidir luz de longitud de onda fija que se sabe excita al sistema; posteriormente, mediante un sistema de detección se determina la intensidad de la emisión en función de la longitud de onda.

Una vez conocidas las bandas de emisión del material se procede a determinar que longitud de onda las excitan, para lo cual se fija el monocromador del sistema de detección en el valor de la longitud de onda de uno de los picos de emisión y se efectúa la excitación de la muestra variando la longitud de onda de la luz de excitación.

La obtención de los espectros de absorción óptica se fundamenta en la ley de Beer la cual establece que el debilitamiento de un haz luminoso de intensidad  $I_0$  al atravesar un espesor  $x$  obedece la siguiente relación:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

donde:

$\alpha$  = coeficiente de absorción óptica ( $\text{cm}^{-1}$ )

$I_0$  = intensidad inicial del haz antes de atravesar la muestra

Si se define la densidad óptica como:

$$\text{D.O.} = \ln \frac{I_0}{I} ; \text{ entonces D.O.} = \alpha x$$

### **Curva termoluminiscente**

El proceso de emisión de luz durante el calentamiento del cristal implica la desocupación de varias trampas de diferentes profundidades en el mismo material. En consecuencia, la luz emitida en forma de grupos de fotones da lugar una curva de luminiscencia en función de la temperatura denominada curva TL.

Los diversos fenómenos relativos a la excitación TL y al proceso de lectura se describen con referencia a las transiciones de electrones y

agujeros entre la banda de valencia y la de conducción del material TL y los estados localizados de los centros de atrapamiento y recombinación. La descripción de estos procesos se lleva a cabo mediante los parámetros relacionados con las imperfecciones, tales como la energía de activación o profundidad de la trampa (E), probabilidades de recombinación (p), factor de frecuencia (s) o factor preexponencial (s'). Dichos parámetros determinan el tipo de cinética que se puede esperar. Para explicar el proceso, la mayoría de los autores<sup>(12)</sup> considera trampas para electrones y centros de recombinación para agujeros, sin embargo, se debe tener en cuenta que existe la misma probabilidad de que ocurra el proceso simétrico, es decir, que los agujeros sean liberados de sus trampas y se recombinen con los electrones en centros de recombinación.

Asumiendo trampas para electrones y centros de recombinación para agujeros, y suponiendo que una temperatura constante (T) se tienen n electrones excitados, existen dos mecanismos de transición radiativa posibles:

**Cinética de primer orden.** en este mecanismo, la recombinación es el proceso dominante sobre el reatrapamiento; por lo tanto, el número de electrones excitados tiene una probabilidad constante de disminuir; entonces si p denota la probabilidad de que un portador de carga escape de su trampa, y n la concentración de portadores de carga retenidos en las trampas, se tiene:

$$p = \frac{-\frac{dn}{dt}}{n} ; \quad \frac{dn}{dt} = -pnt$$

Entonces n decae exponencialmente

$$n = n_0 e^{-pt}$$

La intensidad de la TL está relacionada con la razón de cambio de la concentración de electrones en sus estados excitados, porque es la recombinación de los electrones la que provoca la emisión de la luz. Además la eficiencia en la emisión de luz, es menor que la unidad, de esta manera:

$$I = -c \frac{dn}{dt} \quad \text{siendo} \quad c < 1$$

Donde I se observa que también decae exponencialmente, por lo que tomando  $c = 1$ , para simplificar, se tiene:

$$I = n_0 p e^{-pt}$$

Con condiciones iniciales:  $I = I_0$  para  $t = 0$ ; implica que  $I_0 = n_0 p$ ; entonces para una cinética de primer orden tenemos:

$$I = I_0 e^{-pt}$$

**Cinética de segundo orden.** En este caso, la probabilidad de recombinación es proporcional al número de centros disponibles y se supone que existe un fuerte reatrapamiento

$$p = \frac{-\frac{dn}{dt}}{n^2} \quad ; \quad \frac{dn}{dt} = -pnt$$

Observando la ecuación anterior vemos que decae en forma hiperbólica

$$n = \frac{n_0}{1 + n_0 p t}$$

El decaimiento de la luminiscencia esta gobernada por la ecuación:

$$I = -c \frac{dn}{dt} = c p n^2$$

Tomando las condiciones iniciales de:  $I = I_0$  para  $n = n_0$  y  $c = 1$

Se tiene:

$$I = \frac{I_0}{(1 + \alpha t)^2} \quad \text{donde} \quad \alpha = (I_0 p)^{1/2}$$

El método experimental que nos permite saber si el orden de la cinética es uno, dos o intermedio, se basa en las propiedades de simetría de la curva TL expresadas éstas por una combinación de la temperatura del pico,  $T_m$ , y dos temperaturas,  $T_1$  y  $T_2$  a cada lado de  $T_m$  correspondiente a la mitad de la intensidad del pico. La simetría se puede medir por medio del llamado factor de simetría<sup>(13)</sup>,  $\mu_g$  definido como  $\mu_g = \frac{\delta}{\omega}$  donde  $\delta = T_2 - T_m$  y  $\omega = T_2 - T_1$  como se muestra en la figura 6. Chen<sup>(14)</sup>, propuso caracterizar un pico de primer orden por un valor de  $\mu_g \sim 0.42$  y de segundo orden para  $\mu_g \sim 0.52$ . Balarin<sup>(15)</sup> sugirió un tratamiento ligeramente diferente, definiendo el factor de simetría como  $\mu_g = \frac{\delta}{\tau}$  donde  $\tau = T_m - T_1$  el cual deberá ser  $\mu_g = 0.7$  para el pico de primer orden y  $\mu_g = 0.8$  para el pico de segundo orden.

Chen calculó numéricamente el valor de  $\mu_g$  para el caso de una cinética de orden general, en función del orden de la cinética<sup>(16)</sup>. Obteniendo una gráfica que permite determinar el orden de la cinética conociendo el valor de  $\mu_g$ .

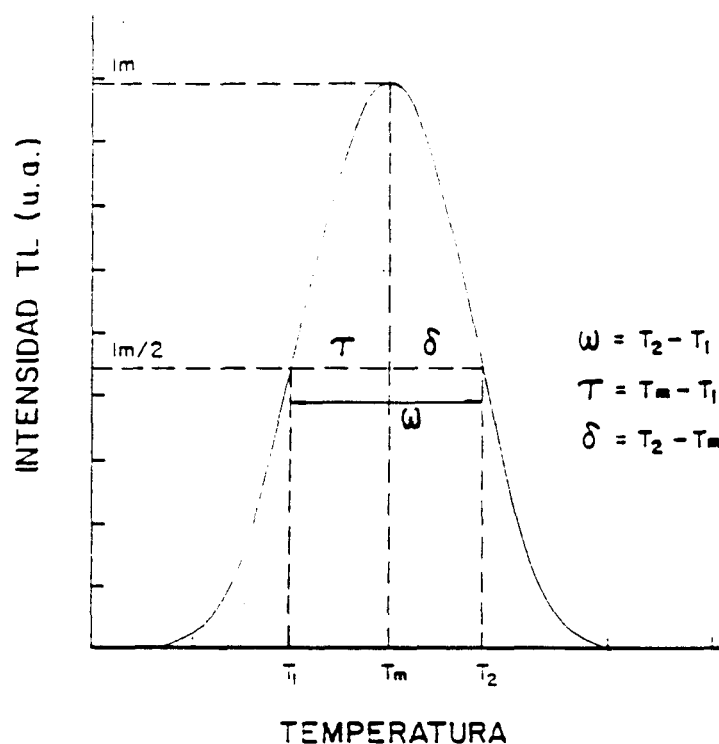


Figura 6. Parámetros de la forma de la curva

## Teoría de la curva TL

Para explicar la relación que existe entre la emisión luminosa y la profundidad de la trampa TL, se calculará la forma de la curva TL.

Considerando una cinética de primer orden, el modelo cinético que permite determinar los diferentes parámetros de las trampas<sup>(17)</sup> se basa en las siguientes hipótesis.

- Los portadores de carga son los electrones
- Existe un sólo nivel de trampas
- No existe recombinación directa entre las trampas y los centros luminiscentes.
- La duración de la vida de los portadores de carga en la banda de conducción es finita.
- No existe extinción térmica ( la probabilidad  $P_{nr}$  de recombinación no radiactiva no cambia con la temperatura); es decir:

$$n = \frac{p_r}{p_r + p_{nr}}$$

- La probabilidad de que un electrón vuelva a ser capturado por una trampa es nula.

La distribución estadística de los electrones atrapados en estados metaestables se puede considerar en equilibrio como una distribución de Boltzmann. Por consiguiente, la probabilidad,  $p$ , de un portador de carga escape de la trampa está dada por:

$$p = s \cdot \exp\left(-\frac{E}{k T}\right)$$

donde:  $s$  = factor de frecuencia ( $s^{-1}$ )

$E$  = energía de activación o profundidad de las trampas (eV)

$T$  = temperatura (K)

$k$  = constante de Boltzmann

$$= 1.38E^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

$$= 8.617E^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$$

La rapidez con que se liberan los electrones es:

$$\frac{d n}{d t} = - n p$$

$$\frac{d n}{d t} = - n s \exp\left(-\frac{E}{k T}\right) \quad (1)$$

De esta ecuación se supone que no hay reatrapamiento; esto es, que los electrones que son liberados de las trampas, siempre se dirigirán hacia los centros luminiscentes.

La intensidad luminiscente es proporcional a la velocidad con que se intercambian los electrones en los centros luminiscentes, como:

$$I = -c \frac{d n}{d t}$$

Entonces

$$I = (-c) n s \exp\left(-\frac{E}{k T}\right) = c n s \exp\left(-\frac{E}{k T}\right) \quad (2)$$

Si se eleva la temperatura del material TL a una velocidad lineal ( $\beta$ ), se tiene:

$$T = T_0 + \beta t \quad \beta = \frac{d T}{d t} \quad \text{y} \quad c = 1$$

La ecuación nos quedará como:

$$\frac{d n}{n} = -s \exp\left(-\frac{E}{k T}\right) \left(\frac{1}{\beta} \frac{d T}{d t}\right) dt$$

$$\int_{n_0}^n \frac{d n}{n} = \int_{T_0}^T \frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{k T}\right) dT = \ln \frac{n}{n_0}$$

donde:

$$n = n_0 \exp\left[-\int_{T_0}^T \frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]$$

Esta ecuación representa la variación de la densidad de portadores de carga atrapados en función de la temperatura.

Entonces la ecuación de la intensidad será:

$$I = \left\{ c n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[ \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right) \right] \right\} \quad (3)$$

Para una cinética de segundo orden, se supone que existe un fuerte reatrapamiento, entonces:

$$I = -c \frac{dn}{dt} = n^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (4)$$

$$s' = \frac{s}{n_0} \text{ (cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

$$I(t) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[ 1 + \frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT' \right]^{-2} \quad (5)$$

Para una cinética de orden general se tiene:

$$I = -c \frac{dn}{dt} = n^2 s^b \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (6)$$

$$s' = \frac{s}{n_0} \text{ (cm}^{3(b-1)} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

$$I(t) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[ (b-1) \frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT' + 1 \right]^{b-1} \quad (7)$$

La primera exponencial es responsable del crecimiento inicial de la señal y representa la aceleración en la rapidez de liberación de portadores de carga a medida que aumenta la temperatura.

La segunda exponencial se origina del decremento de la señal a consecuencia de la disminución en la densidad de portadores de carga en las trampas.

La ecuación anterior representa la curva TL para un nivel único de atrapamiento (un pico en la curva TL). Es decir, el área bajo la curva, es proporcional al número de electrones que fueron inicialmente atrapados ( $n_0$ ) para una trampa en particular; estos es, para ciertos valores de E, s y  $\beta$ .

En un material TL habrá diferentes tipos de trampas, y cada una de ellas es caracterizada por sus propios valores E y s. Por consiguiente, la curva TL presentará diferentes picos TL.

Un modelo matemático que relaciona la TL y la exposición en Roentgen (R) para un material TL es el siguiente: se supone que ( $N_0$ ) es el número inicial de trampas vacías. La creación de trampas por la irradiación esta dada por una constante de proporcionalidad A; el llenado de trampas por irradiación, esta dada por la constante B; y  $N_f$  es el número máximo de trampas, N es el número total de trampas (llenas y vacías), a cualquier exposición y L, el número de trampas llenas a cualquier exposición (R).

Entonces

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

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

cuyas soluciones serán:

$$N = N_0 \exp(-\alpha R) + N_f [1 - \exp(-\alpha R)] \quad \text{y}$$

$$L = N_0 \frac{\beta}{(\alpha - \beta)} [\exp(-\beta R) - \exp(-\alpha R)] + \frac{N_f}{(\alpha - \beta)} \{ \alpha [1 - \exp(-\beta R)] - \beta [1 - \exp(-\alpha R)] \}$$

En donde L será directamente proporcional a la TL.



## **Medición de dosis absorbida**

Existen diversos procedimientos para medir la dosis absorbida, los cuales se clasifican según la necesidad de calibrarlos o no en campos de radiación conocidos. De esta manera, se tienen métodos absolutos y secundarios.

Un método absoluto permite efectuar mediciones precisas. La dosimetría TL presenta ventajas respecto a otros métodos de dosimetría ya que exhibe las siguientes características:

- No necesitan empaque especial
- Cubren un amplio intervalo de dosis
- Retienen la información por mucho tiempo
- No necesitan conexiones entre el dosímetro y el equipo electrónico asociado
- Son sensibles a cualquier tipo de radiación
- Se pueden usar varias veces
- Son baratos
- Se pueden preparar en un laboratorio
- Fácil manejo.

## **Dosimetría TL**

La mayor parte de los experimentos, descubrimientos e investigaciones relativos al fenómeno de TL, son enfocados a aplicaciones para la medición de las radiaciones ionizantes y radiaciones de baja energía, técnica conocida como dosimetría termoluminiscente (DTL)<sup>(18)</sup>. En el campo de la dosimetría de la radiación se puede hacer una división burda, de acuerdo con el intervalo de dosis absorbida que se mida. Las dosis bajas, del orden de los microgray ( $\mu\text{Gy}$ ) son importantes en monitoreo ambiental; las dosis intermedias, del orden de gray (Gy), lo son en radiodiagnóstico y en radioterapia; y las dosis altas, alrededor de decenas de gray, en la irradiación de alimentos para su preservación y para la esterilización de material quirúrgico.

El fundamento de la dosimetría TL se basa en el hecho de que la cantidad de luz emitida por el material puede retener la información por mucho tiempo. Otra característica importante es que existen algunos materiales TL que son casi equivalentes al tejido en un principio, la técnica convencional disponible para dosimetría personal era el método de la película fotográfica, el cual la dosis se determina por el grado de oscurecimiento de la película, aunque no en forma lineal y por ello se debe obtener una curva de calibración.

Por lo consiguiente este método fue reemplazado gradualmente por la dosimetría TL, en virtud de que el segundo presenta ventajas en lo que se refiere a sensibilidad, estabilidad, precisión y exactitud; aunque los dosímetros TL, para ser utilizados deben ser calibrados exponiéndolos a dosis conocidas de radiación. Otra ventaja del método de TL es la sencillez del equipo de lectura, pues consiste en un dispositivo para calentar los materiales TL en forma controlada; y un sistema para medir la luz emitida y transformarla en una señal fácilmente integrable.

## **CAPITULO II**

### **RADIACIONES NO IONIZANTES**

---

## **Introducción**

La población humana siempre ha estado expuesta a radiación natural de niveles relativamente bajos, lo que representa una radiación de fondo, que se ve incrementado por radiaciones adicionales de fuentes producidas por el hombre.

Una característica distinta de las radiaciones no ionizantes y en particular de la luz UV, es que toda la población mundial se encuentra expuesta a ellas y que tiene un remanente casi constante durante largos periodos de tiempo, aunque varía de un lugar a otro de acuerdo con las condiciones geográficas.

Entre los diversos tipos de radiaciones no-ionizantes la luz ultravioleta (UV) es de particular interés por su relativamente alta energía comparada con los otros tipos de radiación incluidos en este grupo. No obstante por su baja penetración su importancia en cuanto a sus efectos biológicos se restringe a los tejidos superficiales.

### **Características físicas**

La luz UV es la región del espectro electromagnético comprendido entre la radiación ionizante débil por un lado y la luz visible por el otro; es decir, en un intervalo entre 100 y 380-400 nm.

El límite inferior de 100 nm es equivalente a un fotón de 12.4 eV de energía, el cual corresponde aproximadamente al límite para la producción de ionización en materiales biológicos importantes. En el otro extremo, el límite corresponde a la luz visible de longitud de onda más corta, la cual varía ligeramente de un individuo a otro pero siempre situada entre 380 a 400 nm.

Debido a las diferencias en los efectos biológicos que produce la luz UV, la Comisión Internacional de Iluminación ha dividido la región UV en la forma siguiente: a la luz UV de longitud de onda de hasta 190 nm se le

conoce como UV en el vacío; a la región comprendida entre 190 y 300 nm UV lejano y a la región de 300 a 400 nm, UV cercano.

Otra manera de dividir la región UV, consiste en llamar "luz negra" o región UV-A a la luz con longitudes de onda en el intervalo de 315 a 400 nm; región UV-B o de eritema al intervalo de 280 a 315 nm y región UV-C o germicida a la radiación con longitudes de onda menores de 280 nm.

La luz comprendida en la región UV-A puede inducir fluorescencia en muchas sustancias, mientras que la mayoría de la luz UV que llega a la tierra proveniente del sol corresponde a la región UV-B.

### **Áreas de riesgo para sobreexposición**

La fuente más importante de exposición a la luz UV la constituye la radiación UV natural. Todos aquellos individuos que trabajan en el exterior están potencialmente en riesgo de sobreexposición, cuyos efectos pueden ser tanto agudos como tardíos.

Los arcos emisores de luz UV constituyen también una parte importante de las condiciones de trabajo en algunos lugares tales como aquellos en los que se trabaja con soldaduras. En algunas técnicas de reproducción gráfica, la luz UV también representa un riesgo de exposición para los trabajadores involucrados.

Otra fuente de exposición importante la constituye la luz UV-C usada en los esterilizadores de comida o de aire.

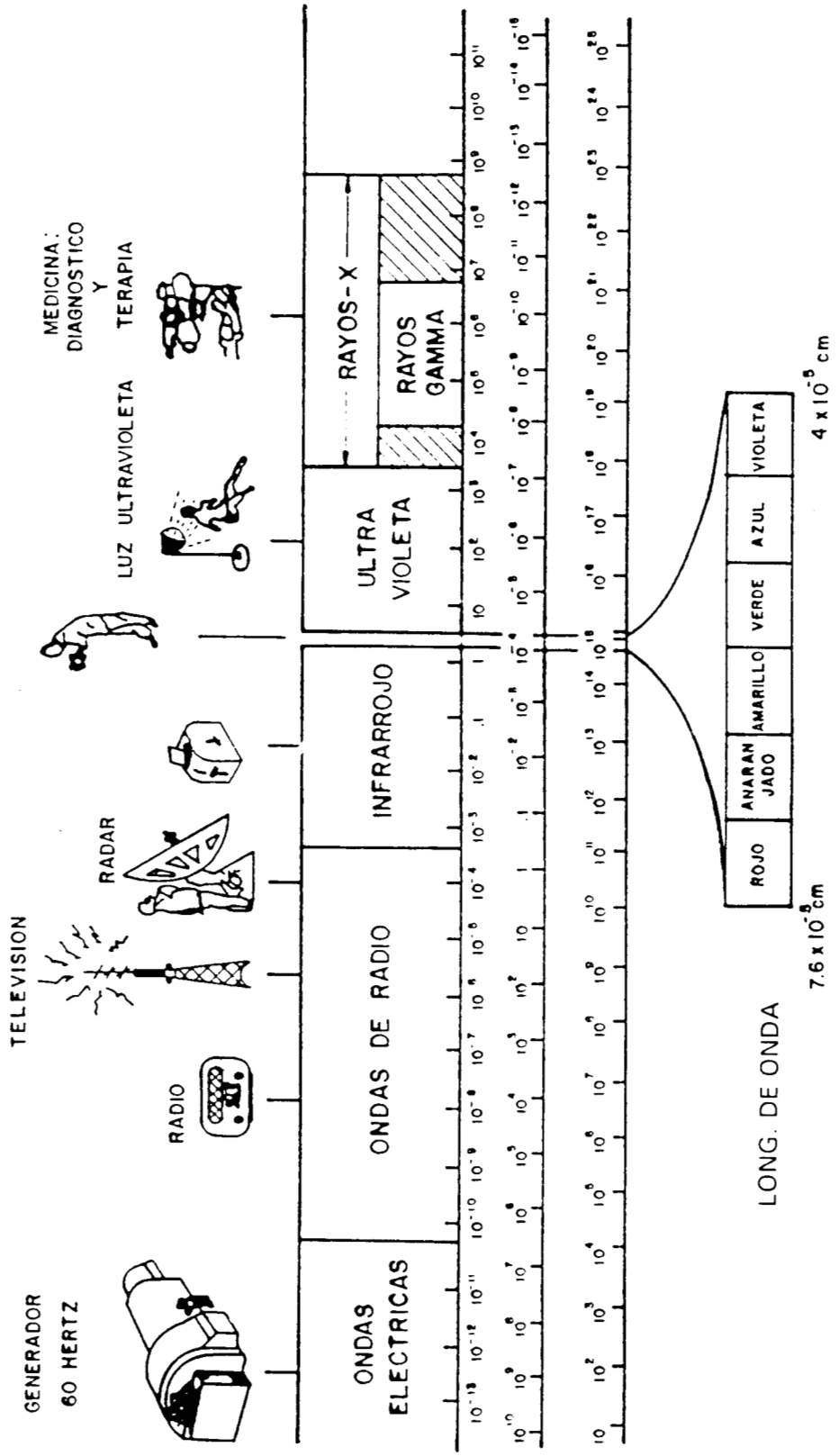
Las fuentes de luz UV para uso cosmético (bronceado), así como las lámparas de luz fluorescente (luz blanca) pueden producir una sobreexposición si no se siguen las instrucciones precisas para su uso.

Algunas fuentes emisoras de RNI se muestran en la tabla I y se observan gráficamente en el espectro electromagnético mostrado en la figura 7.

**Tabla I Intervalo de frecuencia, longitud de onda y energía de algunos tipos de radiaciones electromagnéticas ionizantes y no ionizantes**

Tipo de radiación	Intervalo de la frecuencia	Intervalo de longitud de onda	Intervalo de energía por fotón
Ionizante	> 3000 THz	< 100 nm	> 12.40 eV
Radiación ultravioleta (parte no ionizante)	3000 - 750 THz	100 - 400 nm	12.40 - 3.10 eV
lejana	$3 \times 10^5$ a 30 000 - 1580	1 a 10 - 190	1240 a 124 - 6.53
cercana	1580 - 1000	190 - 300	6.53 - 4.13
UV-C	1000 - 750	300 - 400	4.13 - 3.10
UV-B	3000 - 1070	100 - 280	12.40 - 4.43
UV-A "luz negra)	1070 - 952	280 - 315	4.43 - 3.94
	952 - 750	315 - 400	3.94 - 3.10
Luz visible	705 - 385 THz	400 - 780 nm	0.10 - 1.59 eV
Infrarroja (IR)	385 - 0.3 THz	0.78 - 1000 $\mu$ m	1590 - 1.24 $\mu$ eV
IR-A	385 - 214	0.78 - 1.4	1590 - 886
IR-B	214 - 100	1.4 - 3	886 - 413
IR-C	100 - 0.3	3 - 1000	413 - 1.24
cercana	385 - 100	0.78 - 3	1590 - 413
media	100 - 10	3 - 30	413 - 41.33
lejana	10 - 0.3	30 - 1000	41 - 1.24
Lasers	1500 - 15	0.2 - 20	6200 - 62
clase.1			
clase.2			
clase.3a			
clase.3b			
clase.4			
Microondas (MW)	300 - 0.3 GHz	1 - 1000 nm	1240 - 1.24 neV
EHF	300 - 30	1 - 10	1240 - 124
SHF	30 - 3	10 - 100	124 - 12.40
UHF	3 - 0.3	100 - 1000	12 - 1.24
Radar	56 - 0.23	5.4 - 1300	230 - 0.95
Radiofrecuencia (RF)	300 - 0.1 MHz	1 - 3000 m	1240 - 0.41 neV
EHF	300 - 30	1 - 10	1240 - 124
HF	30 - 3	10 - 100	124 - 12.4
MF	3 - 0.3	100 - 1000	12 - 1.24

LUZ VISIBLE



ENERGIA (eV)

LONG. DE ONDA (cm);

FRECUENCIA (hertz)

ESPECTRO ELECTROMAGNETISMO

Algunas de las fuentes de luz UV antes mencionadas deben usarse bajo condiciones controladas, por lo que siempre será necesario hacer un balance entre las ventajas que se obtienen con su uso y los riesgos en que se incurren.

Sin embargo, la evaluación de una sobreexposición a la luz UV, no debe olvidarse que una cierta cantidad de radiación UV de fondo es necesaria para la vida.

## **Fuentes de luz UV**

La materia a la temperatura de 2500 K o más, puede emitir una cantidad significativa de fotones con energías comprendidas en el intervalo de la luz UV. Tales fuentes emiten un espectro continuo uniforme posiblemente con líneas superpuestas

Las fuentes que se encuentran en la actualidad para la producción de luz UV para las distintas aplicaciones se pueden clasificar en fuentes naturales y en artificiales:

### **Fuentes naturales**

El sol es la fuente más importante de luz UV debido a la alta temperatura de su superficie y a su gran tamaño. La intensidad de la luz UV que llega a la superficie de la tierra es tan alta que probablemente sería letal para la mayoría de los seres vivientes en la superficie si no estuvieran protegidos por la atmósfera, en la que la capa de ozono, en su parte superior, representa un factor muy importante. La longitud de la trayectoria recorrida por la luz UV al atravesar la atmósfera determina la intensidad de la radiación que llega a la superficie de la tierra. Por consiguiente, ésta depende de la latitud geográfica, de la altitud sobre el nivel del mar y de la época del año. La dispersión y absorción por polvo, humo y lluvia también son importantes. La luz UV del sol con longitud de onda inferior a 290 nm prácticamente no llega a la superficie de la tierra. Sin embargo, si el espesor de la capa de ozono disminuyera, se esperaría una disminución apreciable en la absorción en las bandas críticas del UV y un considerable aumento en los defectos biológicos producidos<sup>(19,20)</sup>.



**Tabla II. Algunas fuentes artificiales que producen luz UV**

<b>Fuentes</b>	<b>Tipos de emisión</b>
Descarga de gas	Lámparas bactericidas Lámparas mercuriales lámparas de gases nobles
Fuentes incandescentes	“flashes de bulbo” Lámparas de hidrógeno o de deuterio Arcos de soldadura
Fuentes fluorescentes	Tubos fluorescentes (luz blanca) Tubos de luz negra
Fuentes mezcladas	Arcos de carbono
Otras fuentes	Equipo dental polimérico Linternas de plasma

### **Efectos biológicos de las radiaciones no ionizantes**

Los efectos biológicos de las radiaciones no ionizantes son esencialmente los mismos que aquellos producidos por exposición a radiación incoherente de la misma longitud de onda.

En particular la radiación del espectro electromagnético de la región visible es especialmente dañina para el ojo, porque su penetración en la estructura del ojo es a través de la retina y los efectos de la radiación visible e invisible sobre otros órganos de riesgo, tal como la piel depende de la longitud de onda.

En particular la radiación del espectro visible de longitudes de onda larga no penetran profundamente en el cuerpo y son, por consiguiente, el ojo y la piel los órganos y tejidos que necesariamente deben ser considerados para el estudio de los efectos biológicos de las radiaciones no ionizantes.

## **Transmisión y absorción en tejidos biológicos.**

La penetración de la luz UV de longitudes de onda corta en el cuerpo humano está restringida a la epidermis. La penetración es un poco más profunda a las longitudes de onda mayores (300 nm) y en individuos no pigmentados, en los que hay algo de penetración en la dermis principalmente a las longitudes de onda superiores a los 300 nm<sup>(22)</sup>. Esto es válido también para los ojos, en los que la mayor parte de la luz UV será absorbida por la córnea. Sin embargo, el cristalino y los tejidos de la parte anterior del ojo pueden estar expuestos a la luz UV de longitudes de onda superiores a 295 nm. La retina puede resultar expuesta sólo bajo circunstancias especiales<sup>(23, 24)</sup>.

Las proteínas y los ácidos nucleicos son los más importantes absorbedores biológicos de la luz UV. Después de la absorción, ocurren reacciones fotoquímicas de fundamental importancia biológica. Sin embargo, estas reacciones no están restringidas a los constituyentes de la célula; ya que, por ejemplo, los constituyentes de la fotooxidación de la atmósfera por la luz UV de 360 nm pueden influir directamente en la salud humana<sup>(25)</sup>.

Los mecanismos que podrían ser considerados en la producción de daños para el tejido biológico son<sup>(26)</sup>:

- a) térmico
- b) termo-acústico transitorio (ruptura explosiva)
- c) fotoquímica
- d) rompimiento eléctrico

**Efecto térmico.**- Son los derivados de la desnaturalización de las proteínas y de la inactivación de las enzimas. Esto ocurre cuando hay un aumento en la temperatura debido al incremento de la energía cinética de una molécula biológicamente compleja y éste tiende a romper algunos de sus enlaces químicos. El grado de sobrecalentamiento no depende solamente de la exposición a la energía radiante ( $J.m^{-2}$ ) o de la irradiancia ( $W.m^{-2}$ ) sino de la energía de las radiaciones incidentes y de las condiciones climatológicas, en el caso de radiaciones naturales.

**Daños termo-acústicos:** ocurren con radiaciones de muy alta irradiancia ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) las cuales causan una alta rapidez de exposición térmica y la vaporización de los componentes líquidos provoca la ruptura de las células explosivamente; el resultado del shock resulta perjudicial para el tejido adyacente.

**Daños fotoquímicos:** ocurren cuando los electrones son excitados por los fotones incidentes. La reciprocidad entre la irradiancia ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y la duración de la exposición radiante fatal dada ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) no existe; quizá, además de una secuencia compleja de eventos para un punto final clínico. La reciprocidad de un efecto fotoquímico puede caer si la irradiancia es suficientemente alta para producir daños térmicos en suma o si la duración de la exposición es tan larga que ocurren procesos de reparo biológico.

**Daño por rompimiento eléctrico:** Este podría ocurrir en exposiciones de muy corta duración ( $< 10^{-9}$  seg.) pero de muy alta irradiancia, esto es, cuando la intensidad del campo eléctrico asociada con la irradiancia causa ruptura en el tejido:

Los daños producidos por las irradiaciones dependen de:

- a) Longitud de onda
- b) Duración de la exposición
- c) Tamaño de la imagen formada (solo para fuentes dirigidas artificialmente tipo UV).

## **Efectos biológicos de la luz UV**

El daño al tejido depende de la energía total absorbida y de la duración de la exposición, y no de la velocidad de absorción. La dosis umbral para la producción de fotoqueratitis es de  $50 \text{ J}/\text{m}^2$  a  $270 \text{ nm}$ ,  $550 \text{ J}/\text{m}^2$  a  $310 \text{ nm}$ , y  $22500 \text{ J}/\text{m}^2$  a  $315 \text{ nm}$ <sup>(22)</sup>. Los problemas de daño perdurable o agudo a estructuras oculares más profundas se han ido incrementando con la disponibilidad de nuevas fuentes de UV más intensas, incluyendo láseres.

## **Efectos biológicos en el hombre**

Los efectos biológicos observables en el ser humano debido a la exposición de la luz UV son fuertemente dependientes de la longitud de onda de la radiación incidente; como la penetración de la radiación no es profunda, los efectos están limitados principalmente a la superficie de la piel desprotegida y de los ojos. La penetración dentro de la piel es menor que 1 mm<sup>(27)</sup> y la luz UV es absorbida por los tejidos oculares (principalmente por la córnea y por el cristalino) antes de llegar a la retina.

Para propósito de protección, los efectos biológicos se dividen en dos grupos: determinísticos y estocásticos.

Los efectos determinísticos están asociados directamente con la exposición radiante y por lo general son agudos, mientras que, los estocásticos se asocian con un aumento en el riesgo de contraer ciertas enfermedades, de las cuales la aparición de cáncer es la más importante.

La severidad de los efectos determinísticos varía con la dosis y se les reconoce un umbral, por debajo del cual no se presentan. Estos efectos pueden ser agudos o tardíos y se presentan en cualquier célula o tejido expuesto a la radiación.

Debida a la poca penetración de la luz UV sus efectos en el hombre están limitados a la piel y los ojos; sólo bajo circunstancias especiales podrían extenderse a la cavidad oral.

### **Efectos de la luz UV sobre la piel humana**

La respuesta normal de la piel a la luz UV puede ser clasificada bajo dos circunstancias: efectos agudos y efectos crónicos (en la figura 8 se puede observar la penetración de la luz UV en la piel humana).

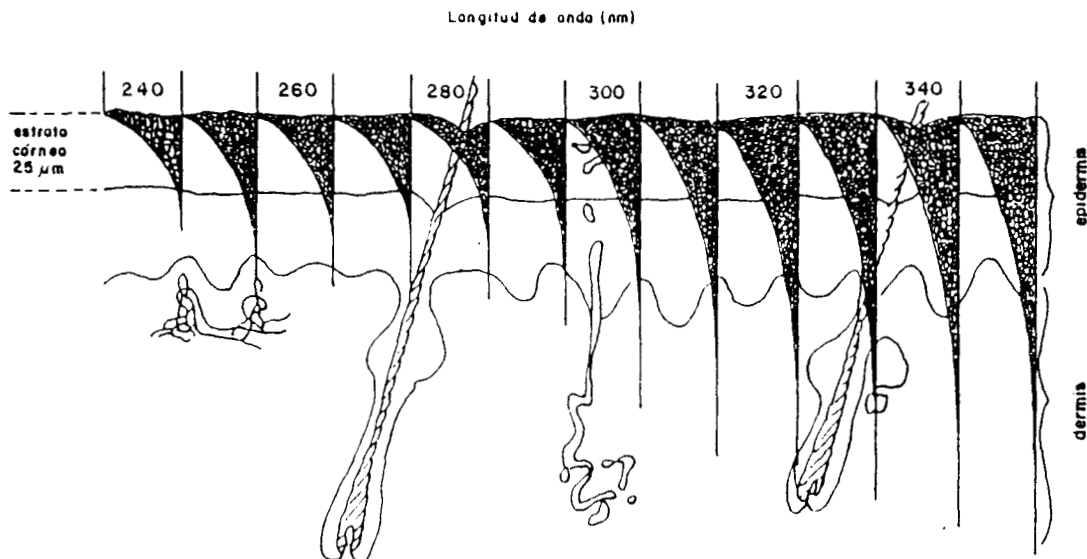


Figura 8. Penetración de la luz UV a través de la piel

**Efectos agudos.** Un efecto agudo es un ataque rápido y generalmente de corta duración, opuesto a los efectos crónicos que son con frecuencia de ataque gradual y de larga duración.

Los efectos agudos y los efectos crónicos podrían ser distinguidos de acuerdo a las longitudes de onda de la luz UV a la que es expuesto el organismo. Las reacciones agudas son consideradas reacciones de quemadura, eritema y producción de vitamina D<sub>3</sub>. Mientras que para los efectos crónicos surge la aparición del cáncer de piel debida a las exposiciones prolongadas y repetitivas a las radiaciones del espectro de la región de UV.

En la piel se presentan cuatro efectos inmediatos: oscurecimiento del pigmento de melanina preexistente, eritema o quemadura por el sol, migración ascendente y producción de gránulos de melanina o bronceado y cambios en el crecimiento de las células de la epidermis.

El oscurecimiento del pigmento se presenta a las longitudes de onda de hasta 360 nm y probablemente es el resultado de una oxidación de la melanina preexistente<sup>(22)</sup>. Este efecto es más acentuado en personas de piel pigmentada.

**Quemadura o eritema:** el eritema es un daño agudo producido por una exposición excesiva a las radiaciones UV. El enrojecimiento de la piel es el resultado debido a un incremento del contenido de la sangre de los vasos de la piel por la dilatación de los vasos sanguíneos superficiales en la dermis, principalmente de las venas subcapilares.

La reacción vascular de la piel a la luz UV, conocida como eritema, comprende vasodilatación, incremento del flujo sanguíneo y aumento de la permeabilidad vascular; lo que conduce a una exudación celular.

El eritema se presenta en dos etapas: Una inmediata y de corta duración (1-2 h), producida principalmente por la luz UV de longitudes de onda superiores a 300 nm. La segunda etapa, se presenta en un periodo de 2 a 10 h después de la exposición y puede durar de uno a varios días. La intensidad del eritema aumenta con la dosis; mientras que, la duración del periodo de latencia varía inversamente a ésta.

La dosis mínima para producir eritema (DME) depende de la absorción y dispersión por la piel; así como de la edad, pigmentación, el grosor de la piel y del área de la región irradiada. Para europeos de piel ligeramente pigmentada, la DME para la piel del tronco es aproximadamente de  $100 \text{ J/m}^2$  para la luz UV de longitudes de onda entre 240 y 290 nm. Para la luz solar de longitud de onda menor que 300 nm, la DME es del orden de  $150 \text{ J/m}^2$ .

El aumento en la pigmentación o bronceado de la piel se inicia por una propagación de los gránulos pigmentados ya existentes a las células vecinas de la piel expuesta.

La luz UV interfiere con el crecimiento de las células de la piel ya que inmediatamente después de la exposición cesa el crecimiento de las células, para en seguida, producirse un aumento de la mitosis, llegando a un máximo en 72 h. Este aumento en la producción de células después de una dosis única de corta duración, produce hiperplasia de la epidermis en un lapso de 5 a 6 días, la cual se observa frecuentemente como un desprendimiento de material celular superfluo. Por efecto de exposiciones continuas, la piel puede llegar a engrosarse con lo que se reducirá la sensibilidad a exposiciones subsecuentes.

Se ha observado que los efectos de altas dosis de radiación UV en ratones son las ulceraciones en la piel y formación de cicatrices. Estos ocurren en el hombre solamente si hay una infección bacteriana asociada.

Como consecuencia de prácticas dentales difundidas recientemente, en las que los materiales plásticos son endurecidos (curados) por tratamiento con luz UV dentro de la cavidad oral, las mucosas de la boca pueden estar expuestas a irradiación UV no deseada cuando los aparatos que se utilizan están defectuosos. Bajo tales condiciones se ha llegado a observar eritema severo de la piel alrededor de la boca.

**Quemadura de sol.** Media hora o una hora en verano en las regiones caucásicas es suficiente para producir efectos no deseados sobre la piel tales como el enrojecimiento. En los ojos podría ser una vasodilatación. Entre 8 - 12 horas podría aparecer el eritema que después de 1 a 2 días desaparece. Exposiciones prolongadas aunque de corta duración provocan la aparición del eritema debido al incremento de su intensidad o de la persistencia de la misma. Una exposición a dosis altas podría resultar en efectos tales como edema, dolor, ampollas y después de unos días aparece el desprendimiento del material existente superfluo. El color de la piel es un factor importante en la determinación de la severidad del daño con la cual la piel se quemaría, para una reacción eritémica es suficiente la permanencia de 15 a 30 min a medio día en la estación de verano que es cuando el sol cae con mayor prevalencia con respecto al ángulo de incidencia sobre la superficie de la tierra, pero la gente con la piel ligeramente pigmentada todavía soporta de 1 a 2 hrs más para que aparezcan las mismas consecuencias que en la gente de poca pigmentación es decir, podría no sufrir quemadura.

**Quemadura e hiperplasia epidérmica.** La aparición del eritema y endurecimiento de la piel (hiperplasia) de la epidermis son componentes significativos de una reacción de quemadura de leve severa.

Una exposición frecuente a los rayos solares causa incremento en el número de melanocitos funcionando y de la actividad de la enzima tirosinasa. Esta produce la formación de nuevas melaninas y además el incremento en el número de gránulos en toda la epidermis.

**Producción de la vitamina D<sub>3</sub>.** No todas las exposiciones a los rayos solares o a fuentes artificiales generan efectos de consecuencia no deseada, para exposiciones de baja intensidad o de poca duración existen efectos benéficos en la exposición de los rayos solares sobre la piel, que es la síntesis de la vitamina D<sub>3</sub><sup>(28)</sup>. La radiación solar en la banda de UV-B convierte fotoquímicamente el 7 dehidrocolesterol en la epidermis a previtamina D<sub>3</sub>. Esta previtamina inmediatamente isomeriza la vitamina D<sub>3</sub> en una reacción controlada por la temperatura de la piel la cual toma dos o tres días para completar la reacción<sup>(29)</sup>. La previtamina D<sub>3</sub> es fotolábil y una exposición excesiva a la luz del sol produce en su fotólisis materiales inertes biológicamente, tales como el lumisterol y taquisterol. De hecho, la producción de la previtamina D<sub>3</sub> está limitada al intervalo de más de 5 - 15 % del contenido total de la 7 dehidrocolesterol en la piel durante el periodo de exposición de la persona a los rayos solares<sup>(22)</sup>. La vitamina D<sub>3</sub> no entra en la circulación antes del siguiente día después de la exposición, ésta puede ser rápidamente degradada en la piel por la luz del sol a suprasterol 1, suprasterol 2 y productos de 5,6-transvitamina D<sub>3</sub> los cuales se cree que son regulados en la producción de la Vitamina D<sub>3</sub> y de la previtamina D<sub>3</sub> en la piel. Para la síntesis de la vitamina D<sub>3</sub> en la piel se requiere de una exposición a la luz del sol de 15 min para las manos (en primavera a otoño) y para los brazos y la cara entre 9 am y 4 pm, es adecuada para proveer la vitamina D<sub>3</sub>. Pero es necesario recalcar que el incremento de la pigmentación de melanina en la piel puede limitar la producción de la vitamina D<sub>3</sub><sup>(25)</sup>.

### **Efectos biológicos en los ojos**

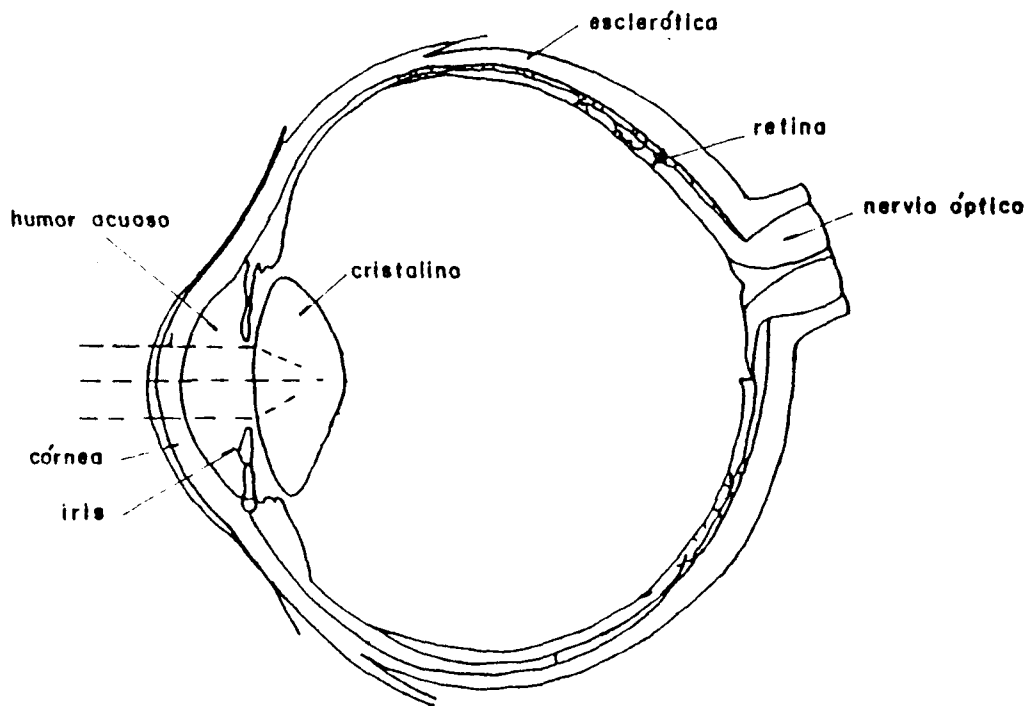
Experimentos con animales han mostrado que tanto una exposición aguda intensa como exposiciones largas de baja intensidad, inducen opacidades en el cristalino<sup>(30)</sup>. La longitud de onda más eficiente para la producción de opacidades lenticulares es de 300 nm siempre y cuando se exceda el valor de umbral de 1500 J/m<sup>2</sup>.

Si la exposición llega a alcanzar un valor de aproximadamente el doble del umbral, el daño se hace permanente.



En los ojos, los principales efectos dañinos de la luz UV son la fotoqueratitis y la conjuntivitis, los cuales aparecen de 2 a 24 h después de la exposición. Los principales síntomas son hiperemia aguda y fotofobia, los que duran de 1 a 5 días; y por lo general no hay lesiones residuales. La fotoqueratitis es causada principalmente por la luz UV-B. La máxima sensibilidad de la córnea se sitúa entre 270 y 288 nm<sup>(31)</sup>.

La figura 9 muestra esquemáticamente la penetración de la luz UV en el ojo. La luz UV-C (100 a 280 nm) y UV-B de 280 a 315 nm son absorbidas por la córnea. Los efectos resultantes de una sobreexposición a estas longitudes de onda son principalmente de tipo fotoquímico: fotoqueratitis (inflamación de la córnea) y conjuntivitis (inflamación de la conjuntiva). Hay un periodo latente entre la sobreexposición y la aparición de síntomas el cual es de varias horas.

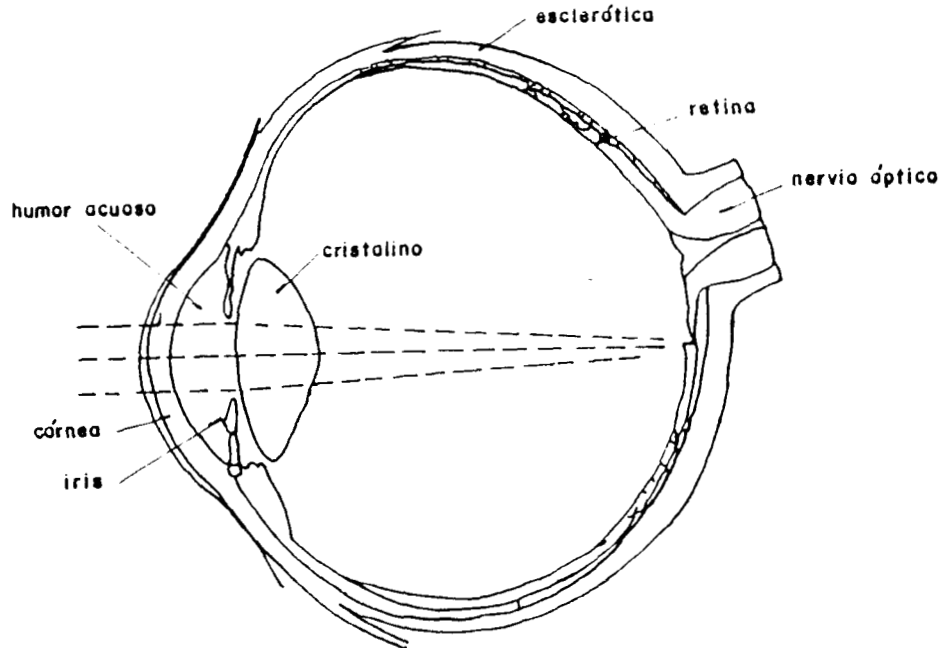


*Figura 9. Penetración de la luz UV al ojo, la UV-C y UV-B es absorbida por la córnea mientras que la UV-A es penetrada al cristalino*

La radiación UVA (315 - 400 nm) es absorbida en el cristalino produciendo desde una opacidad fotoquímica hasta cataratas. El periodo latente antes de los efectos de una sobre exposición son observados y pueden ser por muchos años.

La córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo son muy transparentes a la luz visible, alrededor del 5% de la luz es absorbida por la retina y usado para la visión, con alrededor del 50% absorbida en el pigmento epitelial empezando en los tubos y el resto es transmitido al coroideo.

La luz visible es refractada y enfocada a la interfase del aire/córnea y por el cristalino para formar una imagen sobre la retina. Estos resultados enfocan un gran incremento en la irradiancia entre la córnea y la retina. Esta ganancia óptica es igual al radio de las áreas de la pupila (7 mm de diámetro) y la imagen (10 mm de diámetro) del cual es alrededor de 500,000. La figura 10 muestra esquemáticamente la penetración de la luz visible a través del ojo a la retina.



*Figura 10. Penetración de la luz UV-A y visible a través del ojo*

El pigmento epitelial el cual representa el contorno de la retina y los tubos y conos son los tejidos y células de mayor riesgo.

Los mecanismos térmicos y termo-acústicos son responsables por el daño causado por la exposición de ondas continuas.

La pérdida de la visión causada por la quemadura o lesión podrían no ser permanentes dependiendo de la magnitud de la exposición.

## **Efectos tardíos**

Los efectos tardíos pueden clasificarse en dos grandes grupos: en determinísticos y en estocásticos.

**Efectos tardíos determinísticos.** Estos efectos ocurren en la piel y en el ojo. Después de una exposición prolongada a la luz solar por períodos prolongados, la dermis podría empezar a degenerarse con un decremento ó pérdida en la elasticidad debido a la degeneración de fibras colagénicas combinado con otros cambios histológicas.

La epidermis podría estar implicada en el desarrollo de una queratosis actínica. La importancia de esta lesión es la difícil situación para evaluar los efectos adversos sobre la dermis; pero sin embargo, físicamente se determina por la ocurrencia del incremento de una rapidez de proliferación celular y una cierta cantidad de células atípicas. Este sugiere que podría presentarse un estado precanceroso.

El desarrollo de carcinoma de células escamosas se podría presentar alrededor de la queratosis actínica.

Algunos de los tipos de cataratas vistas en personas de edad avanzada podrían ser debidos a exposiciones repetidas a la luz UV, especialmente de UV-A, durante varios años.

**Efectos tardíos estocásticos.** Los efectos tardíos estocásticos son aquellos para los cuales la probabilidad de que una persona sufra algún

tipo de daño debido a exposiciones a la luz UV y su severidad es función de la dosis.

Después de una irradiación a piel desprotegida los efectos adversos son los cánceres de piel. Hay tres tipos de cánceres concernientes a este tipo de efectos:

- carcinoma celular basal
- carcinoma de células escamosas
- melanoma maligno

Aunque es difícil inferir que los melanomas sean producidos solamente por las radiaciones UV, hasta ahora se ha podido corroborar que se presenta en la piel de los ratones después de una exposición de luz UV (320 nm), (280-320 nm) .

### **Fotosensibilidad**

Los efectos fotodinámicos en sustancias orgánicas se asocian a la luz UV-A y a su extensión en la región de luz visible. La energía es absorbida primero por los fotosensibilizadores, que son sustancias de bajo peso molecular presentes en las células, y luego transferida a una molécula blanco. Desde el punto de vista clínico, la fotosensibilidad describe la acción combinada de la luz UV y una sustancia química, lo que puede conducir a reacciones fototóxicas o fotoalérgicas.

La fotosensibilidad es una respuesta común en todos aquellos individuos cuya piel es irradiada con suficiente energía y con la longitud de onda apropiada, en presencia de una sustancia fototóxica; cuyo resultado puede ser una reacción de quemadura solar común. La fotoalergia es menos frecuente y se cree que depende de una reactividad alterada, provocada por una reacción antígeno-anticuerpo.

Exposiciones prolongadas a la luz solar por períodos de varios años, producirán degeneración de la dermis como una disminución de la elasticidad en combinación con otros cambios histológicos. Los síntomas visibles serán profundas arrugas en la piel (tipo surcos) dando una apariencia de envejecimiento prematuro. También puede estar involucrada

la epidermis, con el desarrollo de la queratosis actínica. Así mismo, algunos tipos de cataratas, por lo general en personas de edad avanzada, pueden deberse a exposiciones repetidas a la luz UV, especialmente a la luz UV UV-A durante varios años.

## **Normas y procedimientos regulatorios**

Las radiaciones no-ionizantes son capaces de causar efectos adversos en los sistemas biológicos bajo ciertas circunstancias. La exposición no controlada de las RNI puede causar efectos que pueden producir cambios que resultarían potencialmente dañinos para el sistema biológico, aunque existen normas de protección radiológica para este tipo de radiaciones, pero su nula difusión y conocimiento hacen que estas radiaciones pierdan importancia, por la inhabilitación en la práctica de dichas guías. Tres fases podrían ser identificadas en el desarrollo de normas y procedimientos regulatorios; la primera de ellas es la identificación y estudio de los cambios biológicos y posibles daños a la salud. La segunda, basándose en tales estudios, en la que son derivadas y propuestas las normas y procedimientos. Estos generalmente, son de dos tipos, procedimientos de exposición (que conciernen al POE) y de emisión (que conciernen a instalaciones y equipos que emiten RNI).

La tercera fase es la interpretación de las normas de exposición y de emisión en procedimientos adecuados para cada país. Introducir una nueva legislación, es aplicar los principios legislativos aprobados y aceptados por expertos en este campo, aunque en muchos casos esta legislación es suplementada por reglas específicas de acuerdo a las necesidades específicas. Por tal motivo las normas generales de las recomendaciones en las aplicaciones técnicas son con frecuencia inapropiadas como base para procedimientos regulatorios en aspectos metodológicos para las radiaciones no ionizantes.

La aplicación de cualquier legislación de las medidas de protección pueden prevenir posibles resultados dañinos y optimizar el uso de cualquier tipo de radiación aunque parezca inofensiva. Aunque en nuestro país las medidas de protección son todavía muy remotas tenemos la esperanza de que la mayoría de las industrias y científicos relacionados,

difundan las medidas de protección para prevenir los efectos adversos de las RNI. Porque desafortunadamente tenemos como experiencia en la aplicación de las medidas de control de la contaminación del aire y del agua, lo difícil de aceptar las medidas de protección; más aún en ciudades como México.

La filosofía y principios en el desarrollo de las normas de exposición y de emisión para la RNI pueden ser similares a las medidas de protección emitidas por la ICRP para RI; aunque esto implica la habilidad de saber de que tipo de RNI se trata, además implica tener conocimientos de los mecanismos fundamentales de la interacción de las RNI y de los efectos biológicos estocásticos y determinísticos hasta ahora poco conocidos: La filosofía adoptada por ICRP es el principio ALARA como base provisional para la emisión de las medidas de protección a las RNI.

Para el establecimiento de los límites de exposición y de los procedimientos regulatorios aceptables para la seguridad en el manejo de las RNI tanto ambiental como ocupacional es necesario que sus principios sean aceptados por la comunidad científica y que contenga suplementos adecuados y específicos para cada país.

Las normas de seguridad existentes para la dosimetría de las radiaciones no ionizantes y debida a la sobreexposición de la luz UV, deben de tomar en consideración no solo los efectos dañinos de esta radiación, sino también la necesidad de registrar en cierto nivel mínimo, de irradiación para asegurar la producción de la vitamina D3, la cual es necesaria para la prevención del raquitismo. Esto es de vital importancia en los primeras etapas de la vida del ser humano.

### **Normas de exposición**

Estas normas incluyen los límites básicos y derivados como los señalados en el ICRP. Tienen por objetivo establecer los límites de los niveles de exposición para el público, como el límite de exposición permisible.

## **Normas de Emisión**

Son normas de protección que tienen como objetivo limitar el riesgo de fuentes emisoras de RNI, tales normas requieren de la incorporación de la descripción y diseños de seguridad de las fuentes emisoras para minimizar o prevenir la exposición de las personas a las radiaciones

## **Procedimientos regulatorios**

Estos representan la interpretación de las normas de exposición y de emisión en procedimientos legislativos adecuados al país. Estos pueden variar de acuerdo a la probabilidad y magnitud de riesgo a la salud y los detalles que dependan a las prácticas legislativas de cada país. Algunos de los procedimientos más comunes pueden ser:

- Licencia de las instalaciones o equipos
- Regulaciones sanitarias (reglas)
- Registro
- Notificación
- Procedimientos voluntarios
- Guías y recomendaciones (idioma nacional)
- Programas de aseguramiento de la calidad
- Certificación

Ante esta situación en 1974 se forma la Sociedad Internacional de Protección Radiológica (IRPA) que se encarga de estudiar los efectos adversos de las radiaciones ionizantes y en 1977 se crea, dentro de esta Sociedad, el Comité Internacional de Radiaciones No Ionizantes (IRPA/INIRC), el que en cooperación con la División de Sanidad Ambiental de la Organización Mundial de la Salud (OMS)<sup>(32)</sup> es el responsable de desarrollar las normas y límites relativos a la exposición de las radiaciones no ionizantes.

## **CAPITULO III**

**MAGNITUDES Y UNIDADES USADAS EN**

**DOSIMETRIA DE LAS RNI**

---



## **Introducción**

El interés sobre los programas de monitoreo ambiental engloba principalmente al monitoreo de las radiaciones cósmicas al impacto ambiental.

Un aspecto significativo del monitoreo de las radiaciones no ionizantes así como del monitoreo ambiental es la limitación de la exposición del hombre al medio ambiental; así como las ligeras variaciones del fondo natural.

Las fluctuaciones en los niveles de radiación UV en la superficie de la corteza terrestre se deben a las condiciones climatológicas locales tales como el cambio de la humedad del suelo y/o exceso de agua la cual disminuye la intensidad de las fuentes de radiación natural (UV-B) que llega a esta superficie terrestre y algunas veces actúa como blindaje.

En la interpretación de las exposiciones de campo la dosimetría TL se aplica para medir variaciones en los niveles de radiación ambiental en el tiempo y en el espacio, así como para determinar si se presenta un aumento en la radiación de fondo debido a la radiación adicional proveniente de fuentes artificiales.

## **DTL para radiaciones ionizantes**

En un material TL el número de recombinaciones radiativas es proporcional al número de iones atrapados y por lo tanto, al número de pares "electrón-agujero", creados por ionización. En definitiva, la luminiscencia emitida es proporcional, dentro de ciertos límites, a la dosis absorbida por el material TL. Además se ha demostrado que tanto el área bajo una curva TL como la amplitud de la misma, a una rapidez de calentamiento constante, son proporcionales al número total de iones capturados en las trampas; por lo tanto, el área bajo la curva TL es representativa de la energía luminosa liberada.

El fundamento de la dosimetría TL se basa en el hecho de que la cantidad de luz emitida por el material es proporcional a la cantidad de radiación absorbida y que puede retener la información por mucho tiempo.

Otra característica importante es que existen algunos materiales TL que son casi equivalentes al tejido.

## **Dosimetría de las radiaciones no ionizantes**

En cantidades suficientes de exposición, las radiaciones no ionizantes (RNI) podrían ser nocivas para la salud debido sus efectos biológicos. Como un índice del grado de riesgo, la intensidad de estos agentes nocivos y su interacción con los tejidos pueden ser cuantitativamente expresados en una manera en la cual se entienda físicamente y relacionada para áreas que conciernen a la medicina biológica y en el campo de la física. Para este fin, la dosimetría de las radiaciones no ionizantes ha sido elaboradamente desarrollado como una especialidad esencial de física radiológica.

Los conceptos básicos de dosimetría han estado enfocados directamente a las necesidades de la radioterapia y radiográfico médico, a la investigación en radiobiología y en física, y a la evaluación de los peligros de la radiación nuclear y su lógica fundada en la teoría matemática de los campos de radiación. Sin embargo, el incremento del deterioro en la salud del público y trabajadores expuestos a las radiaciones no ionizantes ha estimulado investigaciones físicas y biomédicas para el desarrollo de instrumentación y normas de protección de la radiación en las regiones de UV, RF y de las microondas del espectro electromagnético<sup>(33)</sup>.

Muchos de los soportes de la ciencia física en el campo de la protección contra las radiaciones no ionizantes y principalmente en las regiones de RF y de las microondas se ha derivado de la ingeniería eléctrica; las siguientes definiciones: densidad de flujo de energía, rapidez de dosis absorbida y potencia total absorbida (integral de rapidez de dosis absorbida) así como la discusión de las perspectivas físicas y de daño a la salud intentan ser una extensión de los conceptos dosimétricos para las RNI en la región del espectro electromagnético. Las relaciones funcionales se basan enteramente en las ecuaciones de Maxwell y ellas indican consideraciones dosimétricas las cuales son peculiares para este intervalo de frecuencias.

## Definición de cantidades dosimétricas para microondas

La esencia de la dosimetría de las microondas podría ser fundada en la teoría matemática de las ecuaciones de transporte de los campos de radiación. Una ecuación de transporte describe el flujo de radiación en términos de la intensidad de la fuente (origen), las propiedades de absorción y de dispersión de la materia presente y las cantidades que caracterizan los campos de radiación.

La dosis absorbida podría ser considerada como la imagen de la exposición, tomando en cuenta las propiedades de absorción, dispersión y la geometría de las condiciones de irradiación. La energía absorbida (un parámetro de dosis absorbida), es el trabajo realizado sobre la materia por el campo de radiación "parámetro de exposición".

### Densidad de flujo de energía

La densidad de flujo de energía,  $\dot{X}$ , es un medio de la magnitud escalar de la parte real del vector de Poynting,  $\mathbf{S}$ :

$$\dot{X} = \frac{1}{2} |\text{Re}\mathbf{S}| = \frac{1}{2} |\text{Re}\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*|$$

Donde  $\mathbf{E}$  es la intensidad del campo eléctrico y  $\mathbf{H}^*$  es el complejo conjugado de la magnitud de la intensidad del campo magnético. La densidad de flujo de energía para una densidad de potencia tiene una unidad especial la cual es  $\text{mW}/\text{cm}^2$ .

En general esto no es suficiente para caracterizar una condición de un campo de exposición por un número escalar, tal como la densidad de potencia. Sin embargo, tal expresión podría ser limitado cuando sean aplicados los estatutos de la guía de protección radiológica, si la magnitud de la densidad del flujo de energía es escogida conservativamente. Generalmente una especificación de una condición de exposición es la descripción de los campos eléctrico y magnético conjugados ( $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ), de la onda electromagnética de cada región de interés. La densidad de flujo de

energía es especificada en cualquier material, pero es más importante reconocer el vector de Poynting que depende fuertemente del medio.

### Rapidez de dosis absorbida

La rapidez de dosis absorbida,  $\dot{D}$ , es el cociente de la absorción de una cantidad de energía electromagnética,  $\delta\varepsilon$ , entre la densidad del material,  $\rho$ , en un elemento de volumen ( $\delta v$ ) de la masa del material:

$$\begin{aligned}\dot{D} &= - \left( \frac{\delta \varepsilon}{\rho \delta V} \right) = \frac{d}{d t} \left( \frac{\delta \varepsilon}{\delta m} \right) \quad [ W \cdot kg^{-1} ] \\ &= \left( \frac{1}{2 \rho} \right) \text{Re} [ j\omega\varepsilon |\mathbf{E}|^2 - j\omega\mu^* |\mathbf{H}|^2 ] \\ &= \left( \frac{1}{2 \rho} \right) [ \sigma_E |\mathbf{E}|^2 + \sigma_M |\mathbf{H}|^2 ]\end{aligned}$$

Donde  $\sigma_E = \text{Re}(j\omega\varepsilon)$   
 $\sigma_M = \text{Re}(-j\omega\mu^*)$ .

$j$ ,  $\omega$ ,  $\varepsilon$  y  $\mu^*$ , son  $\sqrt{-1}$ , la frecuencia angular, la permitividad compleja y permeabilidad compleja conjugada, respectivamente. El segundo término de la ecuación de  $\dot{D}$  podría ser omitido para los materiales que no sean fuertemente magnéticos. Los materiales biológicos no están clasificados como fuertemente magnéticos para el intervalo frecuencias de las RF y de las microondas.

### Potencia total absorbida

La potencia total absorbida (integral de rapidez de dosis absorbida),  $\varepsilon$ , es la rapidez de absorción de la energía electromagnética por todo el material en un elemento de volumen de un cuerpo:

$$\dot{\varepsilon} = \int_v \dot{D} \rho dr^3 \quad [ W ]$$

La cual se podría notar que

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon} &= \int_V \dot{D} \rho dr^3 &= \frac{1}{2} \int_V (\sigma_E |\mathbf{E}|^2 + \sigma_M |\mathbf{H}|^2) dr^3 \\ & &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_V [j\omega (\epsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* - \mu^* \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{H})] dr^3\end{aligned}$$

El lado derecho de la ecuación de  $\dot{\varepsilon}$  representa el vector de Poynting de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_V [j\omega (\epsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* - \mu^* \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{H})] dr^3 &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int \mathbf{S}_d \cdot \mathbf{n} dr^2 \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) dr^2\end{aligned}$$

Es muy importante notar que el vector de Poynting  $\mathbf{S}_d$  en esta ecuación está definido dentro del cuerpo dieléctrico.

La ecuación de  $\dot{\varepsilon}$  indica que la rapidez de energía absorbida por la masa  $M$  (integral de rapidez de dosis absorbida) es igual a la rapidez del flujo neto de energía a través de la superficie del área,  $A$ , la cual encierra un determinado volumen.

Las cantidades de afluencia de energía,  $X$ , dosis absorbida,  $D$ , y energía total absorbida (integral de dosis absorbida),  $\varepsilon$ , pueden ser obtenidas por integración de la densidad de flujo de energía, dosis absorbida y de la potencia total absorbida (integral de la rapidez de dosis absorbida) respectivamente sobre un periodo de exposición,  $T$ .

$$X = \int_0^T \dot{X} dt$$

$$D = \int_0^T \dot{D} dt$$

$$\varepsilon = \int_0^T \dot{\varepsilon} dt.$$

Las relaciones entre las cantidades dosimétricas y físicas, así como sus unidades son ilustradas en la tabla III.

**Tabla III. Relación entre cantidades dosimétricas y físicas de la RF**

Dosimétrica	Cantidad		Funciones	Unidades		
	Simb	Física		Simb	S.I	Dimens
		campo eléctrico	<b>E</b>	$\mathbf{E}(r,\omega)$	Volt/m	LM/(T Q)
		campo magnético	<b>H</b>	$\mathbf{H}(r,\omega)$	Amper/m	Q/LT
Densidad de flujo de energía	$\dot{\chi}$	vector de poynting	$\frac{1}{2} \text{Re} \mathbf{S} $	$\frac{1}{2} \text{Re} \mathbf{E}\times\mathbf{H}^* $	Watt/m	M/T <sup>3</sup>
Rapidez de dosis absorbida	$\dot{D}$	potencia específica absorbida	-	$(1/2\rho)[\sigma_{\epsilon} \mathbf{E} ^2 + \sigma_M \mathbf{H} ^2]$	Watt/kg	L <sup>2</sup> /T <sup>3</sup>
Integral de rapidez de dosis absorbida	$\dot{\epsilon}$	potencia total absorbida	-	$\int_V \dot{D} \rho dr^3$	Watt	L <sup>2</sup> M/T <sup>3</sup>

Las definiciones de las cantidades dosimétricas para los campos de las RF y de las microondas conceptualmente siguen las prácticas establecidas para la dosimetría de las radiaciones ionizantes. Sin embargo, para un cuerpo que se encuentre en las cercanías de una fuente emisora de las RF, la dosis absorbida, no solo se deberá de las radiaciones emitidas por la fuente sino también de las radiaciones generadas por el campo electromagnético debido a las cercanías de dicha fuentes<sup>(34, 35,36)</sup>.

La densidad de flujo de energía puede ser definida como el flujo de energía generada por los campos (campo incidente más campo disperso) dentro de un cuerpo biológico cuando éste es radiado (los campos son alterados por la presencia del cuerpo biológico) para toda onda plana incidente, donde son obtenidos los **E** y **H** en un medio dispersivo. Aquí la definición de dosis absorbida y de integral de dosis absorbida demuestran

la dependencia de la absorción de energía en  $|E|$  y en  $H$ . Este es importante notar para un medio de diferente permitividad y permeabilidad, la longitud de onda podría ser diferente a una misma frecuencia. Entonces, la frecuencia y la longitud de onda, son características fundamentales de un campo electromagnético y parámetros indispensables para una irradiación.

### **Dosimetría de la luz UV**

Los efectos de la luz UV sobre los sistemas biológicos muestran una fuerte dependencia sobre la longitud de onda de la luz incidente. Por esta razón la especificación de la exposición a la luz solar en unidades radiométricas tienen un valor limitado en muchas instancias en fotobiología porque no toma en cuenta el contenido espectral de la fuente. De hecho, la exposición efectiva es determinada con la frecuencia, de la cual es obtenida la importancia de la irradiancia espectral solar por medio de las funciones apropiadas de las longitudes de onda, e integrando sobre el intervalo de las longitudes de onda para el cual el espectro de acción no es cero. Las exposiciones efectivas biológicamente pueden ser determinados de dos maneras<sup>(1)</sup>:

- Mediante el uso de un dispositivo que mida la irradiancia espectral de la luz del sol una o varias veces durante un periodo de exposición.
- Mediante el uso de un dispositivo cuya respuesta relativa a longitudes de onda semejantes sea similar para un efecto biológico en particular.

Desde el punto de vista del establecimiento de normas y valores límites, es deseable no solo poder hacer mediciones de la cantidad de radiación emitida por una fuente, sino también ser capaces de registrar, por medio de algunas formas de dosimetría personal, las dosis recibidas por las personas expuestas.

La mayoría del equipo disponible en la actualidad para la medición de la dosis en relación con la protección, es incómodo, delicado y no está bien adaptado para sus uso en el campo.

Por lo general, estos equipos utilizan un fotomultiplicador (TFM) o un fotodiodo. Otro tipo de dosímetro usa el oscurecimiento de una película plástica (polisulfona y polifenileno).

En la actualidad el polifenileno está siendo usado para monitorear la componente UV de la luz solar en muchas partes del mundo. También la polisulfona satisface los requisitos para un dosímetro de luz UV; es decir, que responde un intervalo de longitudes de onda similar al que produce el eritema en la piel humana y que tiene una respuesta lineal en función de la dosis de luz UV.

Aunque portátiles, ninguno de estos instrumentos puede ser usado para dosimetría personal permanente, sino sólo para experimental y, en casos especiales, con propósitos de protección.

### **Dosimetría termoluminiscente de la luz UV**

El efecto de la luz UV sobre el dosímetro termoluminiscente ha sido ampliamente investigado desde el punto de vista de sus aplicaciones en la medida de las exposiciones de la luz UV y no muchas investigaciones han sido reportados. Uno de los primeros usos que se dieron a la termoluminiscencia (TL) fue precisamente para la medición de la luz UV sobre TL del  $\text{CaSO}_4:\text{Mn}^{(3)}$ . Este material recibió atención subsecuente como detector de luz UV en la región del vacío 100 - 190 nm).

También se ha propuesto el empleo de la termoluminiscencia fototransferida (TLFT) en fluoruro de calcio natural ( $\text{CaF}_2:\text{nat}^{(5)}$ ) para medir radiación UV del espectro solar que llega a la superficie de la tierra ( $\lambda > 290$  nm). La TLFT se ha observado también en otros materiales TL como LiF, el BeO y el  $\text{CaSO}_4^{(37)}$ .

El término TL fototransferida, se refiere a la TL obtenida después de la siguiente secuencia de operaciones:



- El material TL se desexcita completamente; es decir, se vacían las trampas más profundas (en el  $\text{CaF}_2$  esto se logra calentándolo a  $700^\circ\text{C}$ ).
- El material se expone a una cantidad conocida de radiación X o  $\gamma$ .
- Se vacían las trampas de temperatura inferior a  $400^\circ\text{C}$  calentando a esta temperatura. Con lo que permanecen las trampas más profundas.
- Al exponer entonces el material TL a la luz UV, algunos de los electrones que permanecían en las trampas más profundas son transferidos a las trampas superficiales las cuales corresponden a los picos de baja temperatura.

Para el caso de los procesos físicos implicados, un ligero intento de explicación ha sido expresado solamente en el caso de halogenuros especialmente para NaCl, KCl y KBr.

### **1.- Respuesta intrínseca de UV/TL inducida por UV**

Para una frecuencia apropiada se lleva a cabo la excitación, consistente en que un electrón de valencia de la estructura y un electrón base de un átomo de impureza son excitados aún, en el estado metaestable; como consecuencia de la estimulación, podría emitirse una luminiscencia después de una irradiación y calentamiento.

Las curvas TL obtenidas después de dos maneras diferentes de excitación usualmente no son las mismas y en algunos materiales la sensibilidad TL para la excitación UV es muy pequeña. La forma de la curva TL y la sensibilidad son dependientes de ( $\lambda$ ).

### **2.- Blanqueado y desexcitación por UV.**

Si un material TL es expuesto a la luz UV uno podría observar algún efecto de blanqueado en la TL inducida por radiación gamma. La eficiencia

del blanqueado usualmente no es la misma para todos los picos porque cada pico podría tener una dependencia diferente a la longitud de onda.

El mecanismo involucrado es que los electrones en niveles metaestables (atrapados por algún tipo de irradiación de tipo X o  $\gamma$ ) son liberados por excitación de la luz UV.

### **3.- TL Transferida Inducida por UV.**

Este es un caso muy especial de blanqueado con luz UV. Sin embargo, aquí se considera que cuando un electrón es liberado de un nivel metaestable tiene una buena oportunidad para volver a ser atrapado en algún nivel (una trampa diferente). Entonces, tiene lugar una buena distribución de electrones atrapados entre varios tipos de trampas presentes en el material, y la curva TL es generada con diferentes intensidades relativas entre los diversos picos.

El efecto es visto mejor en un material que ha sido irradiado muchas veces con radiación gamma y tratado térmicamente por calentamiento inadecuado. La TL que se presenta corresponde a trampas más profundas que son remanentes en la muestra.

Cuando este material es expuesto a la luz UV, los electrones son liberados de las trampas más profundas y una buena fracción de ellos vuelve a caer en trampas más superficiales. Además cuando la termoluminiscencia es interpretada después de la exposición a la UV en un equipo lector adecuado, uno encuentra picos de alta temperatura y una regeneración de los picos de temperaturas más bajas.

El fenómeno de transferencia por UV es igual de eficiente en muchos de los materiales TL y por lo tanto, pueden ser sucesivamente empleados para medir niveles bajos de exposición.

### **Límites de exposición para las RNI**

Los efectos de exposiciones prolongadas a las radiaciones no ionizantes pueden traer consecuencias graves tales como la degeneración de la dermis de la parte expuesta a dichas radiaciones, con suficiente

energía y con longitud de onda a las cuales los órganos expuestos sean muy sensibles.

La Sociedad Internacional de Protección Radiológica (IRPA) formó, en 1974, un grupo para el estudio de las radiaciones no ionizantes. Este grupo tiene entre otras tareas la de examinar el problema de la protección contra los efectos adversos de la exposición a la luz (UV). En el congreso de la IRPA en París en 1977, el grupo se transformó en el Comité, Internacional de Radiaciones No Ionizantes (IRPA/INIRC)<sup>(33,34)</sup>.

El IRPA/INIRC, en cooperación con la División de Sanidad Ambiental de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es responsable del desarrollo de los documentos acerca de los criterios de salud relativos a la exposición a las radiaciones no ionizantes. Estos criterios forman parte del Programa de Criterios de sanidad Ambiental de la OMS, el cual fue fundado por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP). Los documentos incluyen un resumen de las características físicas, medición e instrumentación, fuentes y aplicaciones de las radiaciones no ionizantes (RNI); así como una revisión completa de las normas disponibles y evaluación de los riesgos a la salud humana por la exposición a este tipo de radiaciones.

El propósito de estos documentos es establecer los principios básicos de protección contra las RNI y en particular la radiación UV no coherente, para que estos sirvan de guía a los organismos nacionales e internacionales o a los expertos individuales que son responsables del desarrollo de reglas, recomendaciones o códigos de práctica para la protección de los trabajadores y del público en general de los efectos potencialmente adversos de la luz UV.

Los límites establecidos por esta pauta, están basados en datos científicos y no en consideraciones de impacto económico u otras prioridades no científicas, por lo que se requiere realizar análisis de costo-beneficio, incluyendo impacto económico de los controles. Sin embargo, a la luz del conocimiento actual, los límites proporcionan seguridad en el trabajo en un medio ambiente expuesto a la luz UV.

El propósito de este estudio es proporcionar las pautas para establecer los límites máximos de exposición de las microondas y de la luz UV en la región espectral entre 180 y 400 nm y garantizar condiciones bajo las cuales se espera que casi todos los individuos puedan estar expuestos sin sufrir efectos adversos. Valores límites establecidos para exposiciones de las radiaciones de las microondas se muestran en la tabla IV.

Estos valores límite para exposición de la piel o los ojos pueden usarse para cualquier exposición potencialmente riesgosa a luz UV. Por ejemplo, la producida por arcos, por descargas de vapor o gas, por lámparas fluorescentes, por fuentes incandescentes o por la radiación solar, pero no se aplican a láseres de UV. Estos límites se exceden con una exposición de 5-10 minutos a la luz solar de verano sobre la cabeza en latitudes entre 0-40°. Así mismo, exceden los niveles que se tendrían por la exposición de pacientes como parte de un tratamiento médico o con propósitos cosméticos.

**Tabla IV. Límites de exposición a la radiación de radio y microondas**

Longitud de onda	Tiempo de exposición	Nivel máximo
$10^{-1}$ a $10^8$ cm	8 hrs por día	10 (mW/cm <sup>2</sup> )
El valor de 10 (mW/cm <sup>2</sup> ) corresponde a la densidad de potencia, la cual es equivalente a los siguientes valores de campo eléctrico o campo magnético.		
Densidad de potencia		10 mW/cm <sup>2</sup>
Campo eléctrico		200 V/m ó 40 000 V <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Campo magnético		0.5 A/m ó 0.25 A <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

Las designaciones de las bandas espectrales para la luz UV son establecidas por la Comisión Internacional de Iluminación y son las siguientes.

UV-A de 315 a 400 nm

UV-B de 280 a 315 nm

UV-C de 100 a 280 nm

La exposición a la luz UV debe ser cuantificada en términos de irradiancia en  $W/m^2$  para exposición continua, o en términos de exposición radiante para exposiciones de tiempo limitado o para pulsos en  $J/m^2$ .

Los límites se aplican a exposiciones dirigidas perpendicularmente sobre superficies frente a la fuente de radiación.

Para la región espectral del UV cercano o UVA (315-400 nm) la irradiancia total sobre la piel desprotegida o los ojos, no debe exceder  $10W/m^2$ , ( $1\text{ mW}/cm^2$ ) para periodos superiores a  $10^3$  segundos (aprox. 17 minutos); mientras que para tiempos de exposición menores que  $10^3$  segundos la exposición radiante no debe sobrepasar  $10\text{ kJ}/m^2$  ( $1J/cm^2$ ).

Para la región espectral de la luz UV actínica, que comprende la UV-B y la UV-C, (180-315 nm) la exposición radiante incidente sobre la piel desprotegida o los ojos por periodos de 8 horas, no debe exceder los valores de la tabla V.

Cuando se tenga una fuente que trabaje con varias longitudes de onda debe determinarse la irradiancia efectiva usando la tabla VI y la siguiente ecuación:

$$E_{\text{eff}} = \sum E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda$$

$E_{\text{eff}}$  = irradiancia efectiva normalizada a una fuente monocromática de 270 nm, en  $W/m^2$  o  $\mu W/cm^2$ .

$E_{\lambda}$  = irradiancia espectral por mediciones, en  $W/m^2\text{ nm}$  o  $\mu W/cm^2\text{ nm}$ .

$S_{\lambda}$  = eficiencia espectral relativa (adimensional)

$\Delta\lambda$  = ancho de banda del cálculo o intervalos de medición, en nm.

**Tabla V. Exposición máxima permisible a la luz UV**

Longitud de onda (nm)	Tiempo de exposición por día	Nivel máximo (mJ/cm <sup>2</sup> )
180	8 hrs	100
190	"	40
200	"	25
210	"	16
220	"	10
230	"	7.0
240	"	6.0
254	"	4.6
260	"	3.0
270	"	4.7
280	"	10.0
290	"	40.0
300	"	200.0
305	8 hrs	1000.0
310 a 400	tiempos < a 1000 seg	1000.0
315	tiempos > a 1000 seg	1 (mW/cm <sup>2</sup> )

**Tabla VI. Irradiancia efectiva**

Duración de la exposición por día	Irradiancia efectiva (E <sub>eff</sub> ) W/cm <sup>2</sup>
8 hr	0.1
4 hr	0.2
1 hr	0.4
30 min	0.8
15 min	1.7
10 min	3.3
5 min	5
1 min	10
30 seg	50
10 seg	100
1 seg	300
0.5 seg	3000
0.1 seg	30 000

El tiempo permisible de exposición a luz UV de 180-315 nm incidente sobre la piel desprotegida o los ojos, puede calcularse dividiendo  $30 \text{ J/m}^2$  entre el valor de  $E_{\text{ef}}$  en  $\text{W/m}^2$ .

**TABLA VII. Efectividad espectral relativa para cada longitud de onda**

Longitud de onda (nm)	Irradiancia espectral efectiva ( $E_{\text{eff}}$ ) en $\text{W/cm}^2$
180	0.03
190	0.03
200	0.03
210	0.075
220	0.12
230	0.19
240	0.30
250	0.43
254	0.5
260	0.65
270	1.0
280	0.88
290	0.64
300	0.3
305	0.06
310	0.015
315	0.003

**Tabla VIII. Exposición máxima permisible a la radiación visible (que son los que corresponden a los umbrales de las radiaciones infrarroja y ultravioleta)**

Longitud de onda (nm)	Nivel máximo	Tiempo de exposición
380 a 400	$1 \text{ mW/cm}^2$	períodos $>$ a 1000 seg
380 a 400	$1 \text{ J/cm}^2$	períodos $<$ a 1000 seg
400 a 700	$1 \text{ cd/cm}^2$	8 hrs por día *
700 a 750	$10 \text{ mW/cm}^2$	8 hrs por día

\* Este límite se refiere al valor de luminiscencia para la radiación blanca medido en los ojos del trabajador.

Estos valores son propuestos para aplicarse a la población trabajadora, pero con algunas precauciones pueden aplicarse también a la población en general. Debe reconocerse, sin embargo, que existen algunos individuos muy fotosensibles que pueden reaccionar adversamente a la exposición a estos niveles. El incremento en el empleo de la luz UV en medicina, en la industria y en la cosmetología producen riesgos potenciales de exposición a este tipo de radiación electromagnética no ionizante. El conocimiento actual de los efectos crónicos y de los mecanismos de daño por la luz UV es limitado; por lo que las pautas anteriores estarán sujetas a revisiones periódicas y a correcciones a medida que se avance en el conocimiento de estos efectos.

### **Magnitudes y Unidades de la luz UV**

Las magnitudes físicas y sus unidades usadas en la dosimetría de la luz UV pueden ser las que son usadas en óptica.

**Irradiancia (E).** Se define como el cociente del flujo radiante incidente en un elemento de área.

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad ; \quad \text{Su unidad en el SI es el watt por segundo (W}\cdot\text{m}^{-2}\text{)}$$

**Energía radiante (Q).** Es la energía emitida, transferida o recibida en forma de radiación. Su unidad es el Joule (J)

**Exposición radiante (H).** Es la energía radiante incidente en un elemento de superficie por unidad de área de un cuerpo.

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int E dt \quad ; \quad \text{Su unidad es el Joule por metro (J}\cdot\text{m}^{-2}\text{)}$$

**Flujo radiante ( $\phi$ ).** Es la potencia emitida, transferida o recibida en forma de radiación.

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad ; \quad \text{Su unidad es el watt (W)}$$



## **CAPITULO IV**

### **METODOS PARA DETERMINAR LOS PARAMETROS DE LAS TRAMPAS**

---

## **MÉTODOS PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE LAS TRAMPAS**

### **Introducción**

Durante el fenómeno de termoluminiscencia (TL) parte de la energía absorbida por el material es emitida durante el calentamiento como luz en la forma de una curva luminiscente con uno o más picos.

La posición y forma de los picos en la curva TL dependen de diversos parámetros que caracterizan a los estados energéticos de atrapamiento. Entre los parámetros más importantes se encuentran: la energía térmica necesaria para liberar a los electrones o agujeros atrapados, conocida como energía de activación o profundidad de la trampa ( $E$ ), el factor de frecuencia ( $s$ ) y el orden de la cinética de recombinación ( $b$ ).

Existen varios métodos experimentales para determinar estos parámetros. Sin embargo, los más apropiados son aquellos que se basan en el análisis de la curva TL<sup>(38,39)</sup>.

### **Métodos para determinar los parámetros**

El primer método para estimar la energía de activación a partir de la curva fue propuesto por Urbach<sup>(40)</sup>, quien encontró en forma empírica una estimación razonable para el valor de  $E$  en eV mediante la ecuación  $E = T_m/500$  donde  $T_m$  es la temperatura del máximo del pico TL y está expresada en K.

La mayoría de los métodos que se basan en la forma del pico TL requieren de una curva TL con un solo pico, como la que se muestra en la figura 6. Puesto que la mayoría de las curvas TL que encontramos en la

práctica presentan varios picos TL, es necesario aislar cada pico particular de sus vecinos antes de iniciar el análisis.

El método experimental más conveniente para el aislamiento de un pico TL es aquel propuesto por Hoogenstraaten<sup>(41)</sup>, que consiste en borrar por medio de tratamientos térmicos apropiados todos los picos que preceden a aquel que queremos aislar. De esta manera, cada pico TL se puede analizar individualmente determinando los valores de E, de s y el orden de la cinética.

Se han propuesto diversos métodos de análisis para las curvas TL, estos se basan en algunas características de la curva TL como su forma, o su manera de aparecer o decaer en el tiempo.

La determinación de los parámetros TL se basa principalmente en los modelos propuestos para la construcción teórica de los picos TL.

En este trabajo, para determinar los parámetros de la curva de los materiales estudiados se utilizó el método de deconvolución. El Software se desarrolló en el ININ<sup>(42)</sup>.

### **Método de Deconvolución**

La deconvolución es un método general que permite, en contraste con los métodos experimentales, el ajuste de una curva compleja con la ayuda de una computadora, como la suma de componentes elementales. Este método puede aplicarse también a curvas TL de varios picos.

La deconvolución presenta también la ventaja de que permite la evaluación simultánea de los parámetros de los picos TL sin ningún tratamiento térmico posterior. Además, con este método es posible la optimización de algunas características fundamentales de un sistema TL.

El principal problema que se presenta a dosis bajas para mejorar la razón señal a ruido es la substracción del fondo, y consecuentemente, para conseguir la máxima precisión en la evaluación del umbral de detección.

La deconvolución permite no sólo reducir la dosis mínima detectable hasta por un factor de 10, sino que también hace innecesaria una segunda lectura para evaluar el fondo que ha de restarse (fondo del equipo + fondo del dosímetro), lo que significa un considerable ahorro de tiempo. Además la determinación completa de los picos, combinada con la dependencia sobre la calidad de la radiación (transferencia lineal de energía), hace posible también determinar los componentes del espectro de radiación.

Entre los diversos trabajos acerca de la deconvolución de la curva TL, el de Horowitz es de particular interés<sup>(43)</sup>. En él, se asume que cada pico de la curva TL está descrito por la ecuación aproximada:

$$I_i = I_{mi} \exp \left[ 1 + \left( \frac{\Delta T_i E_i}{k T_{mi}^2} \right) - \exp \left( \frac{\Delta T_i E_i}{k T_{mi}^2} \right) \right] \quad (8)$$

donde:  $\Delta T_i = T - T_{mi}$

$E_i$  = energía de activación para el i-ésimo pico

$T_{mi}$  = temperatura correspondiente a la máxima intensidad del i-ésimo pico

Se supone además, que todos los picos siguen una cinética de primer orden, la ecuación de la curva compuesta es:

$$Y(T) = \sum_i I_i(T) + A + B e^{CT} \quad (9)$$

donde la suma se extiende sobre todos los picos que componen la curva TL. A, es una constante que depende del fondo del equipo y del fondo del dosímetro; y el término exponencial se refiere a la contribución TL en la región infrarroja. En general, si se obtienen  $N(x_i, y_i)$  puntos experimentales con  $Y = 1, 2, \dots, N$  relacionados entre sí por una función Y con parámetros  $i = 1, 2, \dots, N$ , relacionados entre sí por una función Y con p parámetros  $j = 1, 2, \dots, p$  y considerando x como la variable independiente. Se tiene:

$$Y(N) = f(N, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p) = f(x, \bar{\alpha})$$

El parámetro que se debe hacer mínimo es:

$$Q = \sum_i [ Y_i - f(x, \bar{\alpha}) ]^2$$

El cual corresponde a la solución de un sistema no lineal de grado p

$$\frac{\delta Q}{\delta a_j} = \sum_i [ Y_i - f(x, \bar{\alpha}) ] \frac{\delta f ( X_i , \bar{a} )}{\delta a_j} = 0$$

o

$$\phi_j (\bar{\alpha}) = \frac{\delta Q}{\delta a_j} = 0$$

Para resolver este sistema, Horowitz usó el método iterativo de newton-Rapson para un conjunto de ecuaciones no lineales. Este método se basa en la expansión de cada  $\phi_j (\bar{\alpha})$  en series de Taylor alrededor del valor inicial  $a_0$  atribuido al parámetro  $\bar{\alpha}$ , truncándola después del término de primer orden.

Este método resulta efectivo sólo si el valor inicial dado al parámetro  $\bar{\alpha}$  es cercano a la solución real; en otra forma no existe convergencia.

Por el contrario, si se selecciona el método de la  $X^2$  sí existe convergencia, aunque muy lentamente. Horowitz hizo una modificación al método de Newton-Rapson insertando un parámetro  $\alpha \gg 1$  y  $\alpha \ll 1$  que corresponden respectivamente a los parámetros de  $X^2$  y Newton-Rapson. Variando los valores de  $\alpha$  en forma conveniente se puede obtener una convergencia óptima<sup>(44)</sup>.

La bondad de la deconvolución se puede estimar calculando el porcentaje de desviación entre los datos experimentales y los datos ajustados.

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \frac{Y_{\text{fit}} - Y_{\text{exp}}}{Y_{\text{fit}}} \quad (10)$$

Aunque el valor más significativo esté dado por:

$$IFOM = \frac{\sum |\Delta Y_i|}{A}$$

donde la suma es sobre los canales y A es la integral de la curva ajustada.

Por este método se pueden estimar los valores de  $E_i$  para curvas de hasta ocho picos TL y se puede aplicar a curvas de formas muy complejas. Sin embargo, presenta los siguientes inconvenientes:

- El uso de una fórmula aproximada para describir la emisión TL (el único parámetro para cada pico es la energía de activación del nivel de atrapamiento correspondiente).
- La necesidad de algunas características de los picos como  $T_{mi}$  e  $I_{mi}$  que algunas veces son difíciles de estimar.
- La estricta conexión entre la convergencia del ajuste y la elección de los parámetros iniciales de los cuales depende el método de Newton-Rapson.

Partiendo de la misma descripción física usada por Horowitz se puede aplicar la técnica de deconvolución a curvas TL complejas como la expresada por la ecuación 09, donde cada componente está descrita por la ecuación correspondiente a un pico TL de orden general<sup>(45)</sup>.

$$I_i(T) = s'_i n_0^{b_i} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \left[ 1 + \frac{s_i^{(b_i-1)} n_{0i}^{(b_i-1)}}{b} \int_0^T \exp\left(-\frac{E_i}{kT'}\right) dT' \right]^{-\frac{b_i}{b_i-1}} \quad (11)$$

donde :  $s'_i =$  factor pre-exponencial.  $cm^{3(b_i-1)} s^{-1}$

$b_i =$  orden de la cinética

$n_{0i} =$  concentración de electrones atrapados inicialmente ( $cm^{-3}$ )

$E_i =$  energía de activación (eV)

Aunque esta fórmula no es aplicable al caso de primer orden ( $b = 1$ ) porque sería divergente, se puede considerar el límite cuando  $b \rightarrow 1$  entre los valores posibles de  $b$ .

La integral que aparece en la ecuación 11 puede ser calculada o bien ser aproximada por una serie asintótica<sup>(46)</sup>.

$$\int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{k T'}\right) dT' \sim \left[ T' \exp\left(-\frac{E}{k T'}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{k T'}{E}\right)^n (-1)^{n-1} n^{-1} \right]_{T_0}^T \quad (12)$$

Basándose en la ecuación 09 se aplica el método de los mínimos cuadrados, para lo cual se puede aplicar la subrutina MINUIT; con lo que es posible buscar el mínimo de una función multidimensional haciendo mínima la  $X^2$  de la siguiente relación:

$$\sigma^2 = \sum_T \frac{[Y(T)_{\text{exp}} - Y(T)]^2}{\sigma^2(T)}$$

donde:  $Y(T)_{\text{exp}}$  = valor experimental de la intensidad TL a la temperatura T

$Y(T)$  = valor esperado para  $Y(T)_{\text{exp}}$

$\sigma^2(T)$  = valor esperado de la varianza

En virtud de que los datos experimentales se ajustan a una distribución de Poisson con media  $\mu > 10$ , ésta se puede aproximar a una gaussiana y por lo tanto es posible aplicar el método de los mínimos cuadrados. Entonces la varianza se puede expresar como:

$$\sigma^2(T) = Y(T)$$

Una representación gráfica se puede obtener graficando la función:

$$X(T) = \frac{Y(T)_{exp} - Y(T)}{Y^{\frac{1}{2}}(T)} \quad (13)$$

La cual es una variable normal esperado de cero y una desviación estándar de uno.

Esta técnica tiene como ventajas las siguientes:

- Es posible estimar todos los parámetros de los picos en la curva TL, incluso el orden de la cinética, usando la fórmula general que describe el proceso físico.
- No se requiere un conocimiento previo de los parámetros geométricos de los picos.
- Aunque existe una limitación en el número de picos que pueden ser analizados (ocho), éste es suficiente para la mayoría de los materiales TL.

Las limitaciones de la técnica se deben a las suposiciones efectuadas para describir el fenómeno físico, tales como considerar que la curva TL es una combinación lineal de componentes individuales, suponer que todos los coeficientes de ponderación son iguales a la unidad y que no existe correlación entre la desocupación de un nivel determinado de atrapamiento y la transferencia a otro nivel.



## **CAPITULO V**

### **CARACTERISTICAS DOSIMETRICAS DE UN MATERIAL TL PARA RNI**

## **Introducción**

Cualquier material que se pretenda se útil en la dosimetría de las radiaciones no ionizantes en base al fenómeno de la termoluminiscencia debe presentar ciertas características básicas tales como: una curva TL adecuada, buena sensibilidad, respuesta lineal en función de la dosis, desvanecimiento bajo, buena reproducibilidad, etc.

## **Curva termoluminiscente**

Se utiliza el término de curva termoluminiscente (curva TL), para indicar la representación gráfica de la cantidad de luz emitida (intensidad TL) en función de la temperatura o del tiempo. Este patrón de luminiscencia en función de la temperatura, es característico de cada material y puede presentar uno o varios máximos, llamados picos TL, en proporción a la concentración de los distintos tipos de trampas o impurezas incorporadas en el material que hacen la labor de trampas.

La aparición de picos TL a bajas temperaturas, indica que existen trampas en estados metaestables de baja energía, que se desocupan fácilmente a temperatura ambiente en un corto tiempo; o bien, proporcionar al material un tratamiento térmico a bajas temperaturas.

La forma de la curva puede ser alterada por diversos factores. Así, es común que, en la mayoría de los materiales TL, las variaciones en los niveles de exposición produzcan cambios en la forma de la curva TL, debido a que no todas las trampas se saturan a la misma exposición. Al mismo tiempo, un tratamiento térmico previo a la lectura modificará la forma de la curva.

## **Sensibilidad**

La sensibilidad de un material TL se puede expresar como la relación de la intensidad de luminiscencia producida por el material por unidad de exposición a la radiación, también puede definirse como la

cantidad de luz emitida por el material por unidad de exposición a la radiación, y está determinada por su eficiencia TL intrínseca, la cual representa la proporción de la energía absorbida que se transforma en fotones luminosos. La determinación de este parámetro es muy complicada ya que depende de las características del equipo lector, tales como la respuesta espectral del tubo fotomultiplicador (TFM), el coeficiente de amplificación electrónica, etc., y de las características físicas del material TL, especialmente de su transparencia óptica.

La sensibilidad de un material puede incrementarse al introducir un elemento extraño en la estructura cristalina del compuesto original, el cual funciona como activador del fenómeno.

De esta manera, la sensibilidad de un material TL es válida sólo para el equipo y para las condiciones a las que se determinó. Generalmente esta propiedad se verifica considerando al DTL comercial (DTL-100) como referencia.

### **Respuesta termoluminiscente en función de la dosis absorbida**

La curva de respuesta de un material TL en función de la dosis absorbida comprende por lo general tres regiones. lineal, supralineal y de saturación.

La región lineal es la más interesante porque en ella se efectúan las medidas con la máxima precisión. Esta zona está limitada por los fenómenos generadores de señales espurias mencionados anteriormente los cuales alteran la precisión de las mediciones.

Para fines prácticos, es conveniente utilizar la región lineal o bien aquella en la que se produzca una línea recta en escala logarítmica, para simplificar la calibración y uso del material en dosimetría.

En la región de supralineal, la sensibilidad de muchos materiales TL se incrementa con la dosis absorbida. El origen de éste fenómeno aún no está bien determinado y puede ser diferente según el material TL considerado<sup>(47,48)</sup>. Si bien la sensibilidad de los materiales TL es superior en la zona supralineal, la precisión de las mediciones es inferior a la que

se obtiene en la zona lineal. Esto se debe a la necesidad de introducir un factor de corrección, el cual genera errores suplementarios y que varía notablemente con la transferencia lineal de energía de la radiación.

La zona de saturación se alcanza cuando todas las trampas están ocupadas, presentándose un fenómeno de inversión de la sensibilidad, consecutivo a la coloración de los cristales y a la destrucción de ciertos elementos de la estructura cristalina por efecto de la irradiación. Es evidente que las mediciones efectuadas en la vecindad de este punto implicarán un error demasiado grande.

Debe hacerse notar que el tratamiento térmico de regeneración aplicado a un material TL irradiado hasta la zona de saturación no le restituye sus propiedades iniciales. Por tal motivo, es recomendable no utilizar nuevamente un material TL que haya sido expuesto a dosis altas de irradiación.

### **Respuesta termoluminiscente en función de la energía y del tipo de radiación.**

#### **Radiación electromagnética**

La figura 11 muestra la respuesta teórica de diversos materiales TL en función de la energía de la radiación electromagnética incidente, para una dosis absorbida en aire de 10 mGy. En la zona inferior a 150 keV predomina el efecto fotoeléctrico ya que el coeficiente másico de absorción de energía varía considerablemente en función de la energía de los fotones y del número atómico efectivo del material considerado. Por esta razón, los materiales compuestos por elementos de número atómico bajo, presentan una respuesta que varía poco con la energía de la radiación. Materiales tales como el BeO, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> y LiF resultan de particular interés porque su respuesta en función de la energía es prácticamente constante; por lo que se dice que estos materiales son equivalentes al tejido. Los materiales cuyo número atómico efectivo alto (CaSO<sub>4</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) presentan una sensibilidad muy alta a bajas energías<sup>(9)</sup>.

$$P = s \exp(-E/kT)$$

donde:

- P = probabilidad de transición.
- s = Factor de frecuencia (característico del centro que determina la velocidad intrínseca de liberación).
- E = Energía de activación
- k = Constante de Boltzmann
- T = temperatura.

La lectura promedio de la permanencia de los portadores de carga en las trampas se relaciona con el periodo  $T_{1/2}$  del fenómeno, ( el tiempo necesario para que la mitad de los portadores de carga sufran la transición) y están dados por:

$$T_{1/2} = 0.693p^{-1} \qquad \theta = 1/p = T_{1/2} / 0.693$$

Un desvanecimiento térmico alto generalmente indica por la presencia de un pico TL a baja temperatura o por un pico demasiado ancho con una componente a baja temperatura.

La exposición de un material TL irradiado a fotones de luz visible o UV puede ocasionar desvanecimiento de la respuesta ya sea por una pérdida y/o una redistribución de los portadores de carga atrapados. Por tal motivo, para prevenir el desvanecimiento es conveniente guardar los dosímetros TL irradiados en lugares donde la temperatura ambiente no sea muy alta y protegidos de la luz.

En algunas ocasiones es conveniente provocar intencionalmente el desvanecimiento de los picos de baja temperatura, sometiendo el material TL a tratamientos térmicos a bajas temperaturas con el propósito de estabilizar sus estados de reatrapamiento por consiguiente la estabilidad de su respuesta.

### **Reproducibilidad**

La reproducibilidad de un dosímetro TL significa, idealmente que debe obtenerse siempre la misma lectura al irradiar el mismo dosímetro a la misma dosis un determinado número de veces, pasando por ciclo

continuo (tratamiento térmico de borrado, irradiación y lectura) del mismo. Un material óptimo para la dosimetría debe tener una reproducibilidad no mayor de 4% DS después de repetir hasta diez o doce ciclos continuos.

## **Influencia de las condiciones externas (ambientales)**

### **Temperatura**

La temperatura tiene un efecto directo sobre la estabilidad de la información contenida en un material TL. Si los detectores son irradiados o mantenidos a una temperatura superior a la ambiente deberán seleccionarse materiales con trampas más profundas que serán los que presenten mayor estabilidad a altas temperaturas.

### **Humedad**

La humedad ambiental altera la superficie de algunos cristales y modifica su transparencia y por consiguiente su sensibilidad. Este fenómeno es importante para algunos materiales TL hidrocópicos .

### **Efecto de la luz**

La acción de la luz sobre un material TL se manifiesta de dos maneras:

Aumento de la señal de fondo, cuando la energía absorbida es suficiente para hacer que los portadores de carga llenen algunas trampas. Es el caso por ejemplo, del  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  o del  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  en los que la exposición prolongada a la luz natural produce un incremento apreciable en el fondo<sup>(49)</sup>:

Desvanecimiento de la información por estimulación óptica de los portadores de carga retenidos en las trampas. Este fenómeno es particularmente importante en algunos materiales TL como el  $\text{CaSO}_4:\text{SM}$ .

Por lo general, los materiales TL, deben mantenerse protegidos de la luz y sólo sacarlos de sus contenedores en el momento de efectuar las lecturas.

Un material TL para uso dosimétrico debe combinar varias características que limitan la elección a sólo algunos compuestos: Las principales propiedades deseables de un material TL para fines dosimétricos son:

- Alta concentración de electrones y/o agujeros y una alta eficiencia en la emisión de luz asociada con el proceso de recombinación.
- Estabilidad de las trampas suficiente para no provocar desvanecimiento indeseable aún en largos periodos de almacenamiento a temperatura ambiente o a temperaturas ligeramente mayores; como la de los lugares tropicales o desérticos, o como en el caso de los usos médicos a la temperatura del cuerpo humano (aprox. 37°C).
- Un espectro de emisión al cual respondan bien la mayoría de los TFM y tal que interfiera lo menos posible con la emisión infrarroja del material TL y sus alrededores (entre 350 a 600 nm).
- Una distribución de trampas que no complique el proceso de evaluación por la presencia de picos de muy baja o muy alta temperatura.

Para tal efecto, se han establecido criterios de funcionamiento especiales así como técnicas para seleccionar, probar calibrar y usar los dosímetros termoluminiscentes (DTL), para monitoreo ambiental y de las radiaciones no ionizantes.

Hasta ahora, la única norma existente para el funcionamiento de DTL en monitoreo ambiental y para radiaciones no ionizantes es la ANSI N545-1975. Esta norma especifica los requisitos mínimos aceptables de funcionamiento para los DTLs usados en monitoreo ambiental, establece métodos de prueba y proporciona procedimientos para la calibración, la aplicación en el campo y la interpretación y reporte de los resultados.

Las pruebas deben efectuarse en condiciones de laboratorio tomando en cuenta las correcciones que se deben aplicar para compensar las condiciones de operación en campo.

## **CAPITULO VI**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

---



## **Instrumentación**

Equipo lector TL victoreen 2800-M  
Equipo lector TL Harshaw 4000  
PC HP Vectra Super VGA  
Cavidad de microondas tipo Evenson  
Cable coaxial para transmisión de microondas  
Sincronizador de microondas  
Detector de microondas  
Monocromador PTI con rejilla de 1200 L/mm, 300 nm

## **Fuentes**

Lámpara de Xenon Xe Oriel Modelo 66057 (190 - 900 nm)  
Fluorómetro Perkin-Elmer modelo 650-10S  
Fluorómetro Perkin-Elmer modelo LS-5

Horno de microondas tipo comercial modelo REM 30E

Frecuencia	2450 MHz
Entrada eléctrica	120 v
Salida	600 W

Generador de microondas para uso industrial o de laboratorio  
modelo MICRO-NOW:

Frecuencia	2450 ± 5 MHz
Potencia de salida	50 a 500 Watts (50 ohms)
Conector de salida tipo	N
Amplitud de modulación	> 0.5%

Irradiador de rayos X marca PASCO  
voltaje 20 y 30 keV  
corriente 60 μA

## Introducción

Los principales materiales TL que existen, pueden dividirse en dos grupos: los de número atómico efectivo bajo y respuesta prácticamente independiente de la energía, pero de baja sensibilidad a las radiaciones y aquellos que tienen muy alta sensibilidad pero con un número atómico efectivo alto y su respuesta es muy dependiente de la energía, a bajas energías tal es el caso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y de  $\text{ZrO}_2$ .

**Oxido de aluminio.** Es un material de alto punto de fusión. Se han tratado de explicar las propiedades estructurales de la alúmina calcinándola a diferentes temperaturas para la obtención de las diferentes variedades cristalinas.

Las propiedades TL de este material han sido ampliamente investigadas<sup>(50)</sup>, ya que fue uno de los primeros materiales que se utilizaron para la dosimetría de radiación ionizante<sup>(51)</sup>. Sin embargo, su baja sensibilidad (0.12 relativa al TLD-100) hizo que se abandonara su estudio.

Más tarde se reanudaron los trabajos referentes al óxido de aluminio para la DTL con la utilización de rubíes y zafiros así como cerámicas de diferentes purezas<sup>(52)</sup>. Nuevas investigaciones condujeron en Hungría<sup>(53)</sup> al desarrollo de un dosímetro  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Mg, Ti, Y}$ . Por otra parte científicos de la India desarrollaron una técnica para la obtención del dosímetro TL  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Mg, Ti}$  calentando con la flama de oxígeno-acetileno<sup>(54)</sup>.

Científicos rusos<sup>(55,56)</sup> han desarrollado un nuevo material TL basado en un monocristal de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  activado con carbono. Este material ha sido comercializado por Victoreen Co. Inc. de USA.

**Oxido de zirconio.** El circonio se presenta como "badeleyita", que es una forma del  $\text{ZrO}_2$  y como zircón,  $\text{ZrSiO}_4$ . El óxido de zirconio ( $\text{ZrO}_2$ ) se obtiene por calentamiento del óxido hidratado y es el dióxido cerámico más estable que normalmente cristaliza dependiendo del tratamiento de sinterizado

monoclínica  $\longrightarrow$  tetragonal  $\longrightarrow$  cúbica (de tipo fluorita)

La estructura monoclinica se transforma reversiblemente de estructura tetragonal a cúbica y viceversa. Las dimensiones de la estructura monoclinica y tetragonal decrecen con el incremento de la deficiencia del oxígeno, pero en la transición de fase parece no ser determinante la ausencia del oxígeno. Dependiendo de la temperatura de sinterizado este material ha sido propuesto para el estudio de la termoluminiscencia, se ha estudiado el efecto de la estructura cristalina y de los centros luminiscentes del  $ZrO_2$  variando la temperatura<sup>(57)</sup> y otros autores han intentado utilizar para monitoreo ambiental<sup>(10)</sup>. La termoluminiscencia inducida en  $ZrO_2$  por rayos X, gamma o luz UV ha sido reportada por varios autores<sup>(6,7)</sup>. Dependiendo de las impurezas empleadas podrían cambiarse las propiedades TL de este material usando como impurezas las tierras raras, como ha sido reportado por algunos autores<sup>(58)</sup>.

Ante la constante búsqueda de nuevos materiales sensibles a la luz UV, surgió la inquietud de estudiar y analizar las características del  $Al_2O_3$  activado con carbono; así como del  $Al_2O_3$  y del  $ZrO_2$  ambos activados con tierras raras. El objetivo de este trabajo es determinar las características termoluminiscentes de los materiales antes mencionados ante las radiaciones no ionizantes (luz ultravioleta (UV) y luz visible); así como el comportamiento del  $\alpha-Al_2O_3:C$  ante las radiaciones de las microondas.

El estudio de las propiedades dosimétricas de estos materiales a las radiaciones no ionizantes se llevó a cabo en dos etapas : la primera fue el estudio de las características dosimétricas ante las irradiaciones de microondas y la segunda el estudio de las propiedades dosimétricas de estos materiales a la exposición de luz UV y visible:

## **I. Respuesta TL ante microondas**

Para llevar a efecto el estudio de las propiedades TL de los DTL ante la irradiación con microondas primero se procedió a acondicionar la cavidad de microondas, colocándole un diafragma para controlar manualmente el tiempo de exposición.

**Homogeneización del lote.** Para el análisis de las propiedades del óxido de aluminio se usaron dosímetros termoluminiscentes (DTLs) de  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  producidos por Victoreen USA. Los cuales fueron sometidos a tratamientos térmicos de borrado a  $800^\circ\text{C}$  durante 30 min. Después de los correspondientes tratamientos térmicos, las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente y una vez enfriadas se procedió a tomar una lectura inicial de estos dosímetros. De esta manera se seleccionaron dos lotes homogéneos. En este estudio, para comparar el comportamiento de las características de estos materiales se usaron materiales de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{PTFE}$  (elaborados en la UAM-I).

**Exposición.** Para la irradiación de los dosímetros TL con microondas, primero se trataron térmicamente, dejándose enfriar a temperatura ambiente. La irradiación con microondas se realizó primeramente en un horno de tipo comercial mientras se instrumentaba la cavidad. Una vez instrumentada ésta se colocaron dentro de ella 6 dosímetros (3 de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  y 3 de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{PTFE}$ ) para su irradiación con microondas bajo las siguientes condiciones:

- 1.- Diferentes tiempos de exposición
- 2.- Diferentes potencias de salida

Para el estudio de la TL fototransferida de los materiales antes descritos, se expusieron las muestras primero a radiaciones de las microondas durante 1 min a una frecuencia de 2450 MHz y una corriente de entrada de 50 mA e inmediatamente se irradiaron con rayos X a una distancia de 28 cm, corriente de salida de  $60 \mu\text{A}$  y voltaje de 30 kV durante 1 min.

## II. Respuesta TL ante luz UV y visible

Para el análisis de las propiedades del óxido de aluminio activado con carbono y del óxido de zirconio activado con tierras raras expuesto a fotones en la región del espectro electromagnético que comprende la luz ultravioleta y visible, se usaron muestras elaboradas en el IIM-UNAM.

## Preparación de las muestras

Las películas utilizadas en nuestro estudio se desarrollaron usando la técnica de Rocío Pirofítico, que consiste en un generador ultrasónico para la generación de aerosol, como se puede ver en la figura 12.

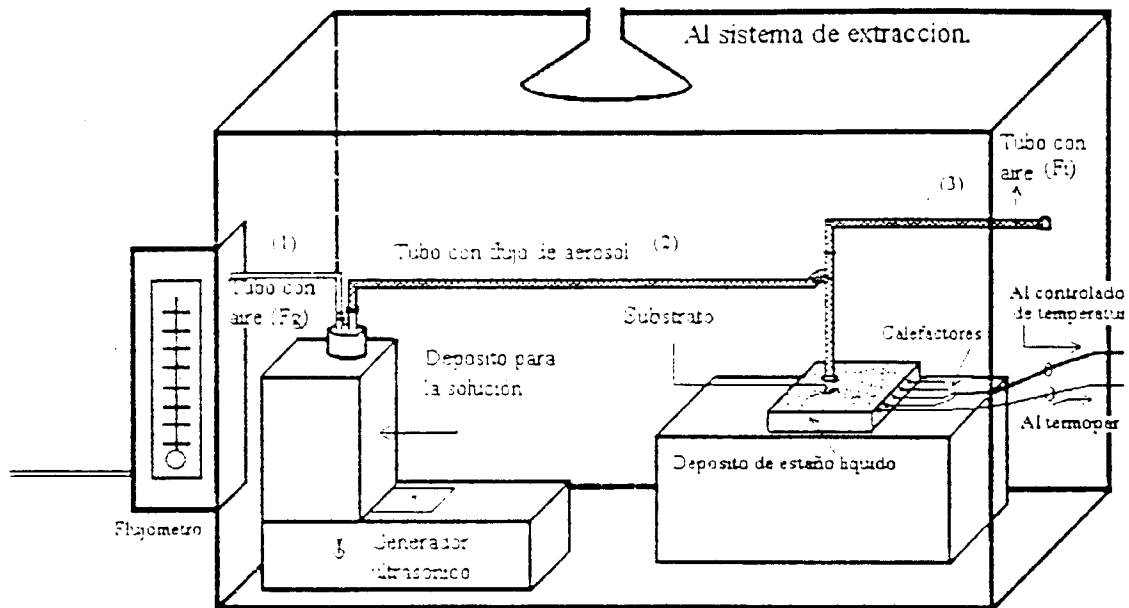


Figura 12. Equipo utilizado para el depósito de películas por la técnica de Rocío Pirofítico

Una vez generado, el aerosol es transportado hacia el sustrato a través de un tubo (2); para este propósito, se introduce en el recipiente con la solución acuosa un flujo de gas (1), que arrastrará el aerosol hacia y a través del tubo de transporte. Con la finalidad de controlar la velocidad con la que el aerosol llega al sustrato, en diversas ocasiones se introduce otro flujo de gas en la parte del tubo de transporte cercana a la cámara de depósito(3). En general esta técnica no utiliza el último flujo de aire sino que el aerosol que va en el tubo (2) es depositado directamente sobre el sustrato.

En nuestro caso el medio conductor fue el aire, la calidad del sustrato va a depender de la frecuencia y de la intensidad del haz ultrasónico así como de la naturaleza del líquido, es decir, de la tensión superficial entre otras propiedades.

El aerosol consistió de una solución 0.05M de oxiclورو de zirconio ( $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  Merk) y cloruro de tierras raras, como material dopante, en agua deionizada.

La adición del material dopante  $TRCl_3$  a la solución de aerosol fue en el intervalo de 1 a 20 % atómico en relación al contenido de zirconio

La cantidad de aerosol producida por este método es una función de la intensidad acústica y de ciertas propiedades físicas del líquido (presión de vapor, viscosidad y tensión superficial).

El tamaño de la gota que conforma el aerosol está determinado por la frecuencia del ultrasonido, la tensión superficial y la densidad del líquido.

La temperatura a la que se depositó la película sobre el sustrato fue variada en el intervalo de 250 a 500°C con incrementos de 50°C.

El tiempo necesario para llevar a cabo el proceso del depósito de la película fue de 10 min.

### **Determinación de la estructura**

Para determinar la estructura cristalina de las películas, éstas se sometieron diferentes tratamientos térmicos al que se denominó temperatura de recocido en el intervalo de 400 a 1200 °C durante 10 min. Posteriormente se utilizó un difractor de rayos X Siemens D-5000 con una radiación de 0.15406 nm de longitud de onda.

### **Determinación de impurezas**

La concentración de las impurezas fue determinada por medio de fluorescencia de rayos-X "Espectroscopía de Energía Dispersa" (EED).

### **Emisión fotoluminiscente**

Para obtener y estudiar el espectro de fotoluminiscencia, la muestra fue estimulada con luz ultravioleta de 275 nm y además se utilizó un espectrofotómetro de fluorescencia Perkin-Elmer 650-10S.

### **Exposición a luz UV/VIS**

Previamente a las exposiciones de las muestras al haz de luz fueron tratadas térmicamente a 300°C durante 30 minutos para las de ZrO<sub>2</sub>:Tb. Mientras que las muestras de ZrO<sub>2</sub>:Eu lo fueron a 510°C durante 10 minutos. Después de los correspondientes tratamientos térmicos, las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente y una vez enfriadas se procedió a tomar una lectura inicial de estos dosímetros.

Posteriormente las muestras fueron expuestas de forma individual ante un haz producido por una lámpara de Xenón acoplado un monocromador para seleccionar diferentes longitudes de onda en el intervalo de 200 a 900 nm

### **Lectura de las muestras**

Las lecturas de los dosímetros TL ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C) se llevaron a cabo usando un equipo analizador TL Victoreen 2800-M; mientras que el modelo 4000 Harshaw fue usado para ZrO<sub>2</sub>:Tb depositado en sustrato de vidrio. Ambos equipos conectados a una PC con los parámetros de operación mostrados en la tabla IX.

Las lecturas de los dosímetros TL de ZrO<sub>2</sub> dopados con europio (ZrO<sub>2</sub>:Eu) se llevaron a cabo usando un equipo analizador TL Harshaw 4000 conectado a una PC con los parámetros de operación mostrados en la tabla X.

**Tabla IX. Parámetros de lectura para  $ZrO_2:Tb$  y  $\alpha-Al_2O_3:C$**

<b>Parámetros</b>	<b>Victoreen</b>	<b>Harshaw</b>
Pre calentamiento	100°C	50°C
Velocidad de calentamiento	10°C/s	10°C/s
Temperatura máxima de calentamiento	300°C	300°C
Borrado térmico	300°C	300°C
Tiempo de adquisición	30 seg	30 seg
Voltaje de operación	811 Volts	615 Volts

**Tabla X. Parámetros de lectura para  $ZrO_2:Eu$**

<b>Parámetros</b>	<b>Harshaw</b>
Pre calentamiento	50°C
Velocidad de calentamiento	10°C/s
Temperatura máxima de calentamiento	600°C
Borrado térmico	600°C
Tiempo de adquisición	100 seg
Voltaje de operación	615 Volts

Tanto la señal TL como la temperatura fueron digitalizadas por medio de dos canales de una interface RC 232C. El software ejecuta las siguientes acciones:

- Forma las curvas TL, las muestra en la pantalla y las imprime en papel
- Almacena los datos en discos flexibles, necesarios para su posterior aplicación al método de deconvolución
- Resta el fondo a una señal para obtener la emisión TL neta
- Calcula la integral de partes preseleccionadas de la curva TL; es decir, de las regiones de interés.



Todas las lecturas se realizaron en atmósfera de nitrógeno, integrando la señal entre la temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) y 300°C para los materiales activados con carbono y terbio; y desde 20°C hasta 600°C para los materiales activados con europio.

### **Propiedades dosimétricas de ZrO<sub>2</sub> y de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Las características analizadas en este trabajo fueron: curva TL, concentración del material dopante, sensibilidad relativa, reproducibilidad de la respuesta TL, linealidad en función de la dosis, respuesta termoluminiscente en función de la longitud de onda y el desvanecimiento de la respuesta TL, cada valor experimental representa el valor promedio de 10 a 15 mediciones.

#### **Curva termoluminiscente**

Para el estudio de esta propiedad se analizaron muestras de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (en forma de pastilla) y de ZrO<sub>2</sub> dopadas con tierras raras, elaboradas y depositadas en forma de película sobre sustratos tanto de vidrio como de cuarzo de forma cuadrada de 5 mm de por lado y 0.05 mm de espesor, a una concentración de 0.05 M de la solución. Después de los correspondientes tratamientos térmicos de borrado en un horno eléctrico (300°C durante 30 min, para los materiales activados con terbio y 500°C durante 10 minutos para los materiales activados con europio), se procedió a la exposición individual ante el haz producido por una lámpara de Xenón acoplada un monocromador para la obtención de una sola longitud característica de 260 nm durante 1 minuto y posteriormente sus lecturas correspondientes.

#### **Procedimiento térmico de borrado**

Para cualquier material TL utilizado en aplicaciones dosimétricas, es muy importante conocer los procedimientos para regenerar sus

condiciones básicas después de cada exposición. Este procedimiento es conocido como tratamiento térmico de borrado y persigue dos objetivos: el primero es desocupar completamente las trampas del material irradiado, el segundo es estabilizar en orden dichas trampas para obtener, dentro de los límites experimentales, las mismas curvas TL después de ciclos repetidos de uso. Para determinar el tratamiento térmico de borrado óptimo para los materiales en estudio, se tomaron lotes de las muestras a una concentración de 5% y se designaron mediante las letras ABCDEFGHI y se les aplicaron diferentes tratamientos térmicos de borrado como se muestra la siguiente tabla XI.

**Tabla XI. Tratamiento térmico de borrado para ZrO<sub>2</sub>:TR**

Muestra	Tratamiento térmico de borrado	
	Tiempo (min.)	Temperatura (°C)
A	60	200
B	45	250
C	20	300
D	30	300
E	10	400
F	60	400
G	30	500
H	10	520
I	10	550

Las letras designadas como A,B,C D y E corresponden a las muestras activadas con terbio y las letras F, G, H e I a las muestras activadas con europio, (cabe señalar el motivo de no haberse aplicado un tratamiento térmico a mayor temperatura para las muestras activadas con terbio debido a que la matriz del depósito es de vidrio por consiguiente si se aumentaba la temperatura se perdía el material o reaccionaba el vidrio con el material en estudio.

## **Sensibilidad**

La sensibilidad de un material TL es de suma importancia ya que el objetivo de nuestro grupo de trabajo es precisamente la de encontrar un material altamente sensible a las radiaciones no ionizantes y esta propiedad se expresa como la relación de la intensidad de la luminiscencia producida por el material por unidad de exposición a la radiación. Para determinar esta propiedad de estos materiales, se colocaron las muestras elaboradas en forma cuadrada en un crisol dándoles un tratamiento térmico de borrado de 300°C durante 30 minutos para ZrO<sub>2</sub>:Tb y 520°C durante 10 minutos para ZrO<sub>2</sub>:Eu. Después de este proceso, se dejaron enfriar las muestras a temperatura ambiente y posteriormente se procedió a la exposición ante una lámpara de Xenón durante un tiempo de exposición de 1 minuto a una longitud de onda de 260 nm, para posteriormente tomar las lecturas.

## **Reproducibilidad**

Para la determinación de esta propiedad se tomaron 10 muestras del grupo E, las cuales fueron sometidas a un tratamiento térmico de borrado de 300°C durante 30 minutos para ZrO<sub>2</sub>:Tb y 520°C durante 10 minutos para ZrO<sub>2</sub>:Eu. Después de los correspondientes tratamientos térmicos de borrado las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Una vez enfriadas se procedió a la exposición individualmente durante 1 minuto a una longitud de onda de 260 nm, tomándose las lecturas inmediatamente después de cada exposición. Este procedimiento se repitió hasta por diez ciclos consecutivos.

## **Desvanecimiento de la información.**

La pérdida de la información de material TL es de primordial importancia para los usos de monitoreo ambiental así mismo para el monitoreo de las radiaciones no ionizantes. Para la realización de esta prueba se seleccionaron muestras de los lotes D y H las cuales recibieron el tratamiento térmico de borrado correspondiente y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Una vez enfriadas las muestras se procedió a la

exposición individual de cada una de ellas a una misma exposición. Posteriormente, a unas muestras les fue tomada la lectura inmediatamente después de la exposición; mientras que a las otras, a las dos, cuatro, 24 y 48 horas después de la exposición. Debido a la respuesta obtenida, no se procedió a dejar las muestras un mayor tiempo.

### **Linealidad**

Para la determinación de ésta característica las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico de borrado de 300°C durante 30 minutos para ZrO<sub>2</sub>:Tb y 520°C durante 10 minutos para ZrO<sub>2</sub>:Eu. Después de los correspondientes tratamientos térmicos de borrado, las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Una vez enfriadas se expusieron individualmente ante un haz colimado de una lámpara de Xenón a una longitud de onda de 260 nm del espectro electromagnético durante diferentes tiempos de exposición.

### **Propiedades ópticas**

Los espectros de absorción óptica fueron obtenidos usando un espectrofotómetro de doble haz Perkin-Elmer modelo  $\lambda$ -5 el cual está equipado con dos lámparas; una de Tungsteno-halógeno y otra de Deuterio, lo que permite determinar el espectro de absorción de sólidos, en el intervalo de longitudes de onda de 190 a 900 nm.

Los espectros de excitación de las muestras, tanto sin irradiar como expuestas a la luz UV, se determinaron utilizando el espectrofotómetro Perkin-Elmer LS-5, excitando con luz de diferentes longitudes de onda entre 20 y 600 nm proveniente de una lámpara de Xenón de 150 W, de emisión continua.

Los espectros de emisión TL se midieron con el mismo espectrofotómetro de fluorescencia Perkin-Elmer LS-5 al cual se le acopló un sistema de calentamiento para la muestra y se le bloqueó la luz de excitación.

## **Instrumentación**

El principio de lectura de un material TL es directo y sencillo. En un tiempo relativamente corto (de unos cuantos segundos a unos cuantos minutos), el material TL es calentado desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 300°C o 600°C; midiendo la luz emitida en forma cuantitativa. El equipo utilizado en nuestro estudio para la determinación de las características dosimétricas de los materiales TL expuestos ante la luz UV y visible es el equipo analizador TL Harshaw modelo 4000 acoplado a una PC.

### **Componentes básicos de un equipo lector TL**

Sistema de calentamiento  
Detector de luz  
Sistema acondicionador de la señal

#### **Sistema de calentamiento**

Uno de los requisitos esenciales para el calentamiento de un material TL es que exista óptimo contacto térmico entre el dispositivo que calienta y el material TL. El equipo utilizado tiene un dispositivo de calentamiento llamado plancheta de calentamiento. Este elemento actúa como el elemento calentador mediante el paso de una corriente eléctrica alta (aprox. 200A) a través de ella. Esta plancheta de calentamiento va colocada en un cajón, el cual es introducido o extraído de la cámara oscura para leer o colocar el material TL respectivamente.

#### **Sistema detector de luz**

Con el propósito de obtener la máxima eficiencia de detección y concentrar la mayor cantidad posible de la luz emitida por el material TL, el equipo lector cuenta con un tubo fotomultiplicador (TFM).

El método mas común para medir la luz cuantitativamente es el uso de un TFM y, en principio, la máxima eficiencia se tendría colocando el material TL en contacto directo con el fotocátodo del TFM. Sin embargo, debido a la alta sensibilidad del fotocátodo a la temperatura se requiere una separación térmica. Para conseguir este propósito se han aplicado varios métodos tales como sistemas de lentes, filtros térmicos, capas de agua, capas de vacío, tubos de luz, etc. La separación térmica más eficaz se logra colocando el TFM a un lado del sistema de calentamiento mejor que encima de éste usando un sistema de espejos para transmitir la señal luminosa.

La selección de la respuesta espectral del TFM va a depender del material TL que se desee caracterizar.

Para cualquier material TL a estudiar es necesario tomar en cuenta la corriente del ánodo del TFM generada por éste sin señal luminosa debido a la emisión térmica de electrones del cátodo (corriente oscura).

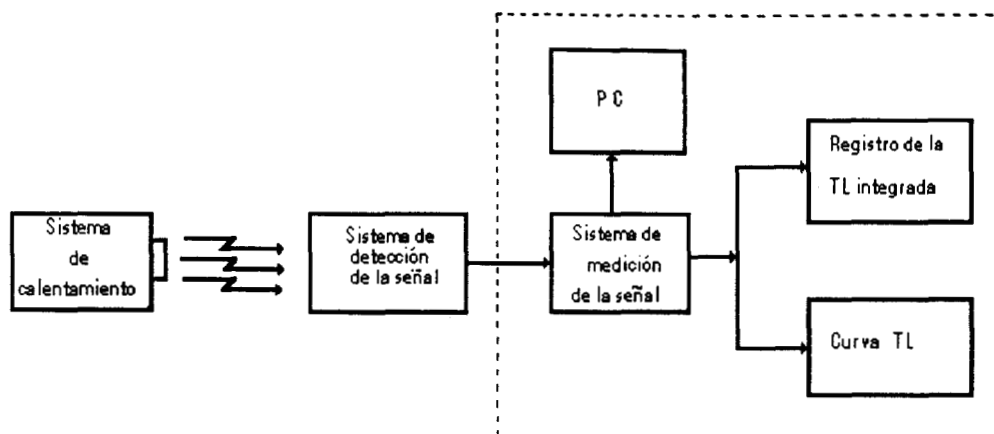
La sensibilidad y la razón señal a ruido pueden ser afectadas por campos magnéticos generados por la electricidad utilizada para el calentamiento en especial cuando se usa CD. Este efecto se puede reducir aislando el TFM de dichos campos.

### **Flujo de gas**

El equipo lector tiene un dispositivo para hacer fluir gas  $N_2$  dentro de la cámara oscura. El flujo de este gas es con el fin de reducir y estabilizar la corriente oscura mediante el enfriamiento de la cámara frontal del TFM y para eliminar la luminiscencia espuria.

### **Fuente de alto voltaje**

En virtud de que la carga sobre el TFM es prácticamente independiente de la señal de salida, se requiere que la CD a la salida de la fuente de alto voltaje sea constante. Esto se logra usando una entrada regulada de bajo voltaje en el circuito oscilador.



*Figura 12. Diagrama de bloques de un equipo lector TL típico*

### **Sistema acondicionador de la señal.**

Este sistema sirve esencialmente para convertir la señal de salida del TFM en una magnitud que pueda medirse cuantitativamente. La corriente de salida del TFM es amplificada para posteriormente ser registrada en un graficador.

### **Determinación de los parámetros cinéticos por el método de deconvolución.**

Para la determinación de los parámetros cinéticos se procedió de la siguiente manera: se tomaron 2 muestras de los lotes D y H cuya concentración es de 5% mol, se calentaron a 300°C durante 30 min. y 520°C durante 10 minutos, respectivamente; una muestra de cada lote se colocó en un crisol de platino par darle el tratamiento térmico adicional a 100°C durante 2 horas (para eliminar posibles picos de temperatura menores de 50°C). Las muestras tratadas térmicamente se enfriaron a temperatura ambiente y se irradiaron con luz UV durante 1 min. Después se les tomó la lectura TL en el equipo lector TL Harshaw

4000. Las condiciones de lectura fueron variables dependiendo del tratamiento térmico de sinterizado de las pastillas. Se empleó por ejemplo, una rapidez de calentamiento desde 1 hasta 10°C/s, una temperatura de 300 hasta 600°C, etc.

La deconvolución de la curva TL, tanto de las muestras activadas con terbio como las que fueron activadas con europio, se realizó mediante el software matemático para la optimización no-lineal con restricciones de desigualdad y de caja, de Fortran 77, basado en el logaritmo de Programación Cuadrática Secuencial modelo aproximado, de Microsoft 77 llamado "PCSDTLA.FOR"<sup>(59)</sup>. Posteriormente se procesaron estos datos con el paquete Lotus123, para obtener finalmente la gráfica en Harvard Graphics, todo esto se llevó a cabo en microcomputadora AcerMate 486DX2/66.

La ecuación (11), Chen<sup>(45)</sup> la presenta de la siguiente manera:

$$I(T) = \frac{s \cdot n_0^b \exp\left(-\frac{e}{kT}\right)}{\left[1 + \frac{s \cdot (b-1) n_0^{(b-1)}}{q} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{e}{kT}\right) du\right]^{\frac{b}{(b-1)}}} \quad (13)$$

donde:

- $T_0$  es la temperatura inicial en kelvin
- $T$  es la temperatura en kelvin (variable independiente)
- $k$  es la constante de Boltzmann
- $q$  es la rapidez de calentamiento en kelvin/segundo

Los parámetros a determinar son:

- $s^*$  factor pre-exponencial ( $\text{cm}^{3(b-1)}/\text{segundo}$ )
- $n_0$  concentración de electrones atrapados ( $\text{cm}^{-3}$ )
- $b$  orden de la cinética
- $e$  energía de activación (eV)



Es muy importante observar que cada uno de los parámetros a determinar en la expresión analítica de Chen para un pico, no están relacionados en forma explícita con la posición y la altura del pico. Por tal motivo se optó por otras expresiones analíticas para los picos como son:

$$I(T) = \frac{s n_0 \exp\left(-\frac{e}{kT}\right)}{\left[1 + \frac{s(b-1)}{q} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{e}{kT}\right) du\right]^{\frac{b}{(b-1)}}$$

aquí

$$s = s' n_0^{(b-1)}$$

La expresión anterior está en términos de: el factor de frecuencia  $s$ , el número de electrones atrapados inicialmente  $n_0$ , el orden de la cinética  $b$  y la energía de activación  $e$ :

$$I(T) = \frac{I_m \exp\left(\frac{e}{kT_m} - \frac{e}{kT}\right)}{\left[1 + \left(1 - \frac{1}{b}\right) \left(\frac{e}{kT_m^2}\right) \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{e}{kT_m} - \frac{e}{kT}\right) du\right]^{\frac{b}{(b-1)}}} \quad (14)$$

La expresión 14 está en términos de: la temperatura donde el pico alcanza su máxima intensidad  $T_m$ , la máxima intensidad  $I_m$ , el orden cinético  $b$  y la energía de activación  $e$ .

$$I(T) = \frac{I_m \exp\left(T - T_m\right)}{\left[\frac{1}{b} + \left(1 - \frac{1}{b}\right) \exp\left(W\left(T - T_m\right)\right)\right]^{\frac{b}{(b-1)}}} \quad (15)$$

donde:

$$W = \frac{e}{k T_m^2}$$

La ecuación 15 es una expresión aproximada a la 14, se obtiene al aproximar el integrando con su serie de Taylor truncada hasta el término de primer grado<sup>(60)</sup>.

Como se puede observar, la ecuación 15 para un pico es más fácil de evaluar ya que no aparece ninguna integral a calcular numéricamente, además ya se tiene relación gráfica con dos de los parámetros, a saber  $T_m$  e  $l_m$ ; así se pueden dar buenas estimaciones iniciales de estos parámetros, como también restricciones de caja para ellos, a partir de la gráfica de los datos experimentales.

Con respecto a los parámetros  $b$  y  $e$  se conocen intervalos para éstos,  $b$  gobierna los semianchos izquierdo y derecho del pico, sus valores están entre 1 y 2, se puede iniciar con 1.5;  $e$  gobierna el ancho total del pico, con 1.7 o más si el pico es delgado.

A partir de los parámetros :  $T_m$ ,  $l_m$ ,  $b$  y  $e$ ; se pueden obtener los parámetros :  $s$ ,  $s'$  y  $n_0$ , es decir, existen funciones para calcular los últimos tres parámetros cuyas reglas de correspondencia dependen de los cuatro primeros.

## **CAPITULO VII**

### **RESULTADOS**

---

## RESULTADOS

### $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C

#### 1.- Irradiado con microondas

Los resultados de irradiar  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C con microondas no fueron favorables debido a que no se observó una proporcionalidad entre la respuesta TL y la intensidad de las microondas y a que no se pudo aumentar la potencia de salida del generador de las microondas para generar mayores defectos en la estructura del cristal, por lo cual se consideró la necesidad de estudiar el fenómeno de fototransferencia.

Los resultados de la TL fototransferida del  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C a la exposición con rayos-X de 30 keV y 60  $\mu$ A, después de ser irradiados con microondas de 2450 MHz de frecuencia y 500 W, se pueden constatar en la tabla XII .

**Tabla XII. Respuesta TL fototransferida del  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C expuesto a rayos-X y previamente a microondas**

Tiempo de exposición (s)	Respuesta TL ( $\mu$ C)	
	Muestras irradiadas con rayos-X sin exponer a microondas	Muestras irradiadas con rayos-X previamente expuestas a microondas
1	13.69	16.63
5	39.10	50.60
10	62.85	75.32

#### 2.- Irradiado con UV/VIS

##### a) Forma de la curva

Una de las características de mayor importancia para el estudio de las propiedades termoluminiscentes de los materiales en estudio es su curva TL.

La curva TL del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  después de una exposición con luz UV/VIS para todas las longitudes de onda estudiadas presentó dos picos. El primero a  $110^\circ\text{C}$ , que se desvanece en pocas horas a temperatura ambiente; el segundo aparece a  $220^\circ\text{C}$  y es más estable.

En la figura 13 se muestran gráficamente estos picos en la curva TL la cual es característica del material. Esta curva es similar a la que se obtiene con radiación gamma<sup>(9)</sup>.

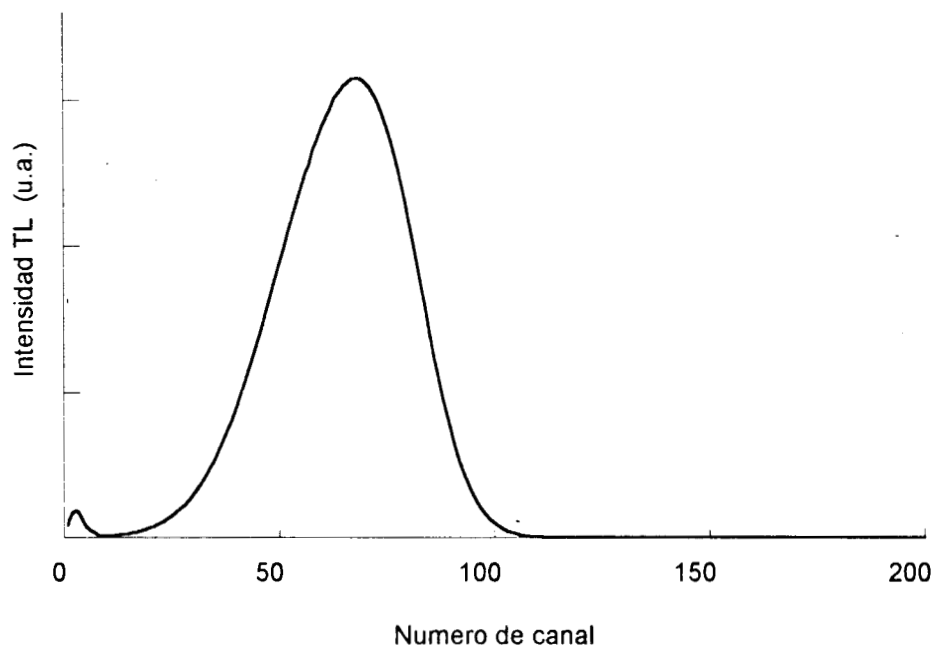


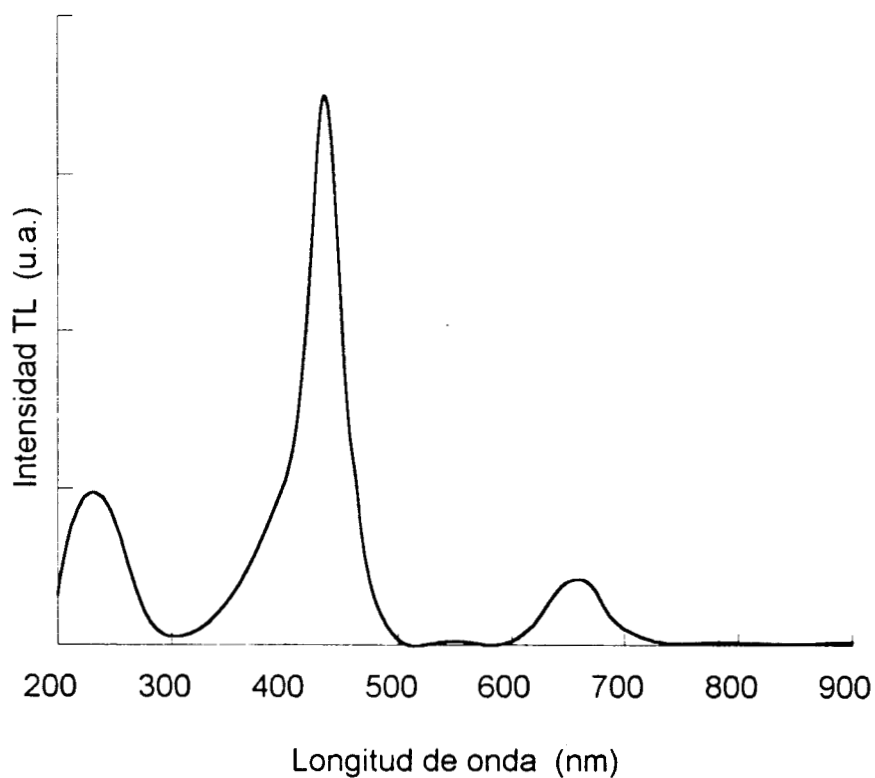
Figura 13. Curva típica del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  expuesto a luz UV/VIS de 200 - 900 nm

#### **b) Respuesta TL en función de la longitud de onda**

Los resultados de la respuesta TL del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  irradiado con luz UV/VIS aparecen en la tabla XIII y se muestran esquemáticamente en figura 14 en la que se pueden observar tres picos: el primero se presenta a 230 nm, el segundo a 435 y el tercero a 660 nm y como se puede apreciar en la figura, el segundo es el pico de máxima intensidad en el intervalo de longitudes de onda entre 200 y 900 nm.

**Tabla XIII. Respuesta TL del  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C expuesto a luz UV/VIS**

Longitud de onda (nm)	Intensidad TL (nC)
200	1250.69
230	3879.88
300	203.26
400	4170.33
435	13967.50
460	4189.94
500	129.63
550	90.95
600	100.96
660	1676.15
700	399.15
800	60.87
900	81.40



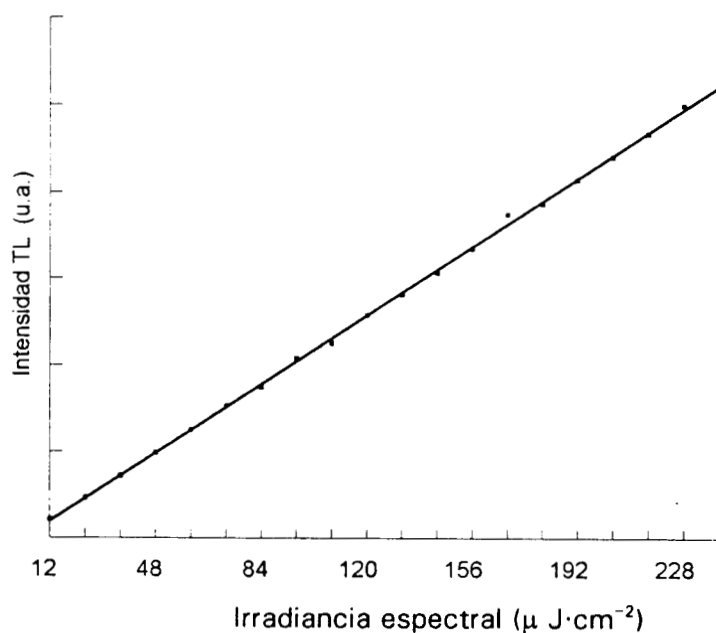
*Figura 14. Respuesta TL del  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C en función de la longitud de onda*

### c) Linealidad

La respuesta TL del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  a una longitud de onda de 435 nm es lineal para diferentes tiempos de exposición. Los datos se muestran en la tabla XIV y esquemáticamente en la figura 15.

**Tabla XIV. Respuesta del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  expuesto a diferentes tiempos de exposición a una longitud de onda de 435 nm**

Tiempo (seg.)	Intensidad TL (nC)	Irradiancia ( $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
5	432.92	12
10	938.30	24
20	1978.05	48
30	3056.30	72
40	4151.42	96
50	5146.42	120
60	6122.24	144
70	7474.42	168
80	8276.68	192
90	9330.71	216
100	10385.69	240



*Figura 15. Respuesta TL del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  en función de la dosis de exposición*

## Características del ZrO<sub>2</sub>:TR

### a) Concentración del dopante

La concentración óptima del material dopante determinada en base a la máxima respuesta TL fue de 5% en la solución y aproximadamente de 1.8% atómico determinado por EED, como se puede ver en la figura 15. Todos los resultados reportados son para una concentración de 5% del material dopante en ZrO<sub>2</sub>

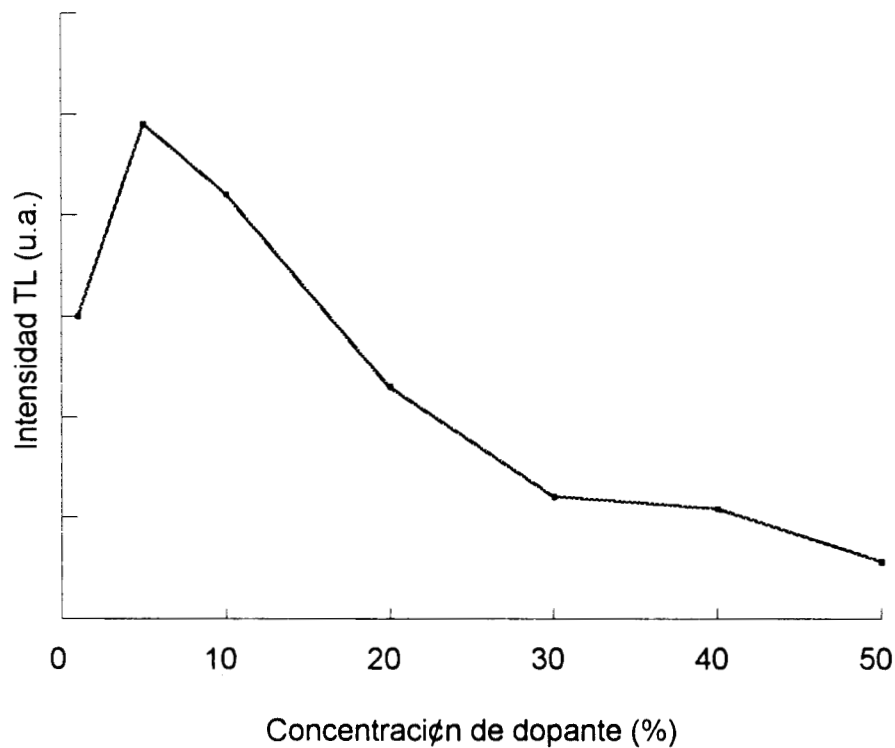


Figura 16. Respuesta TL del ZrO<sub>2</sub> a diferentes concentraciones del dopante

### b) Estructura cristalina

Todas las muestras usadas presentaron una estructura cristalina tetragonal al ser analizadas por difracción de rayos-X. Estos espectros, obtenidos a diferentes temperaturas de dopado se muestran en la figura



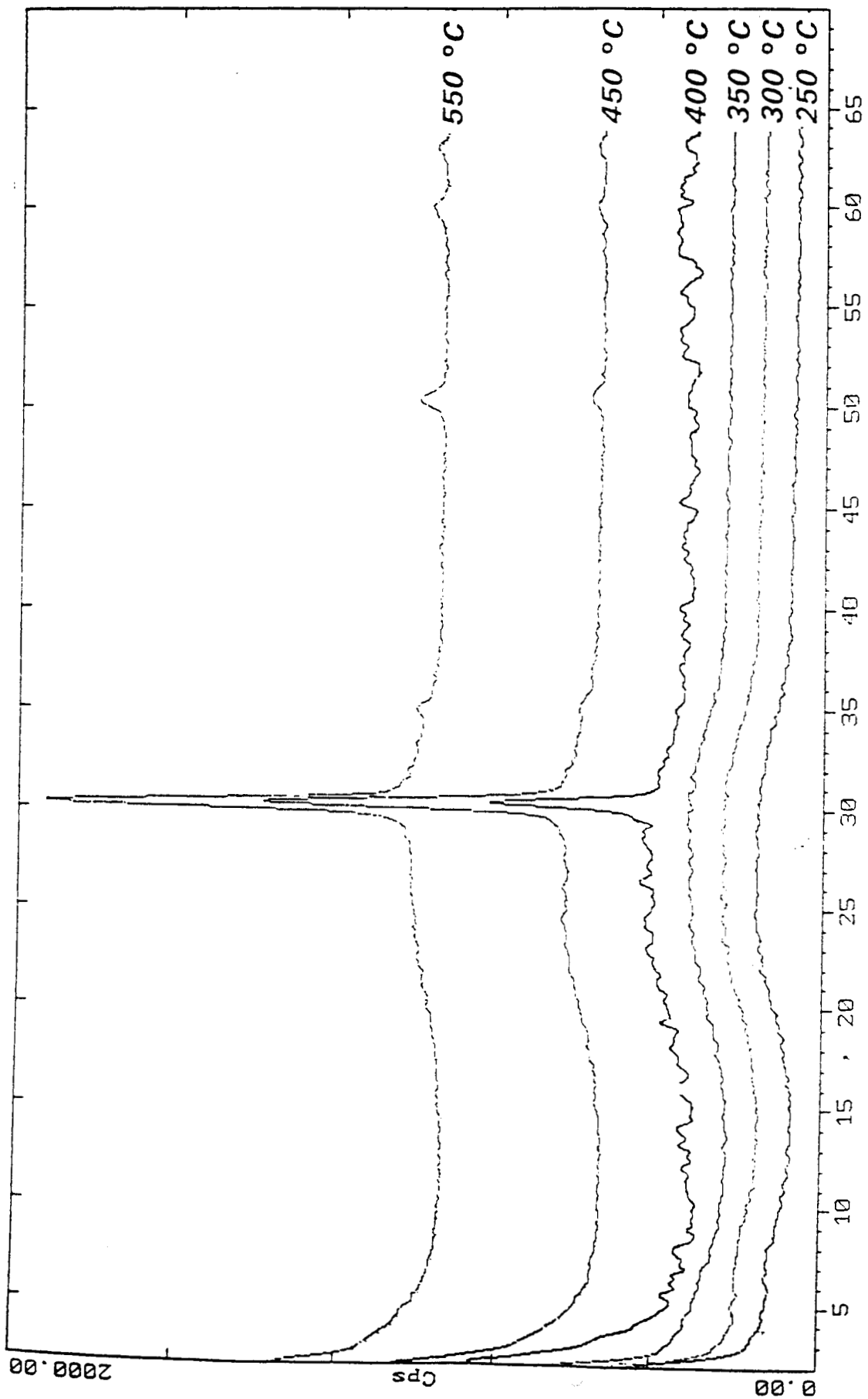


Figura 17. Espectros del ZrO<sub>2</sub>:TR obtenidos por difracción de rayos-X para diferentes temperaturas de recocido.

17. En esta figura podemos observar que para los procesos de temperatura menor de 400°C la estructura del material es amorfa mientras que a procesos mayores o iguales a 400°C la estructura es policristalina y corresponde a la fase tetragonal del ZrO<sub>2</sub>; también en esta figura se observa un pico similar para todas de las muestras utilizadas.

### c) Análisis de impurezas

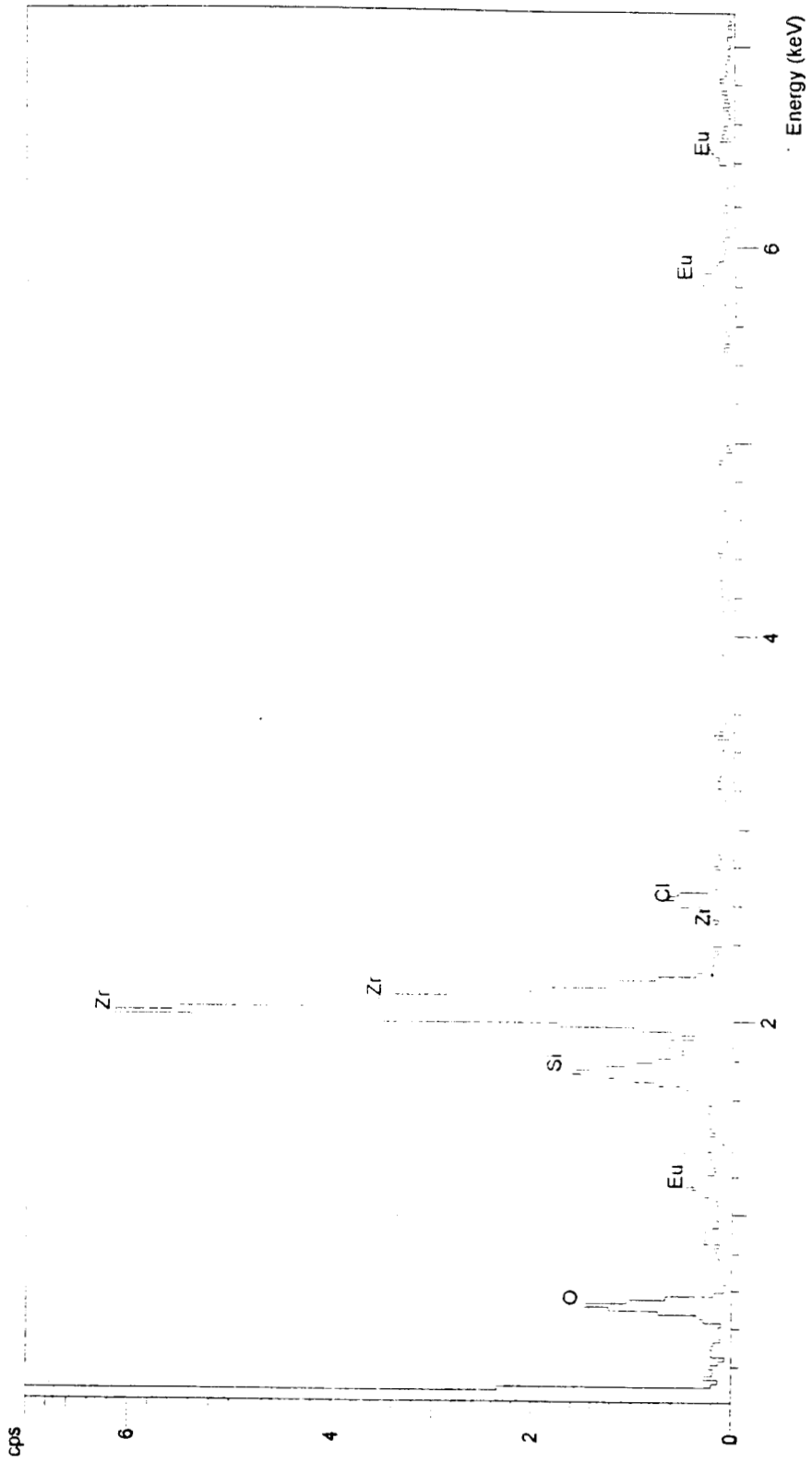
Las impurezas determinadas después de haberse analizado las muestras por (EED); se presentan en la tabla XV. El espectro de EED se muestra en la figura 18.

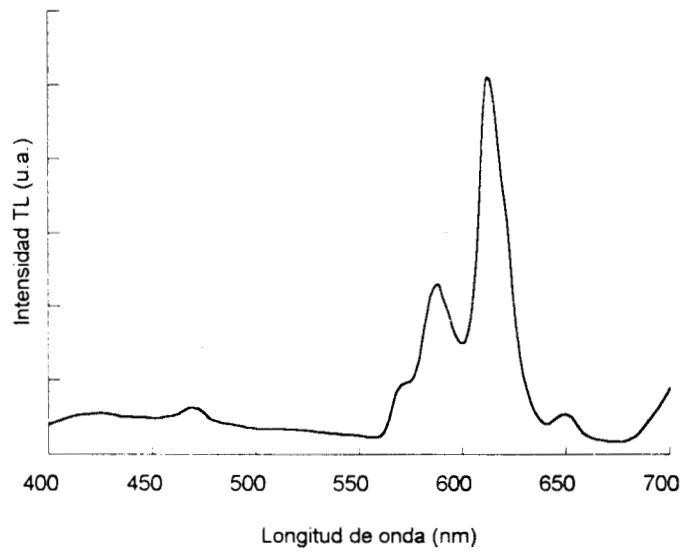
**Tabla XV. Resultados del ZrO<sub>2</sub>:TR en sustrato de cuarzo por EED**

Elemento	Temperatura						Sustrato
	450	600	700	800	900	1000	
O	72.03	72.68	72.62	71.28	71.74	76.80	81.99
Si	4.59	2.40	6.23	5.86	1.36	2.43	18.01
Cl	3.12	1.45	0.95	0.65	0.31	0.00	0
Zr	18.47	21.38	18.79	20.29	24.56	19.28	0
Eu	1.79	2.10	1.41	1.93	2.03	1.49	0

### d) Emisión fotoluminiscente

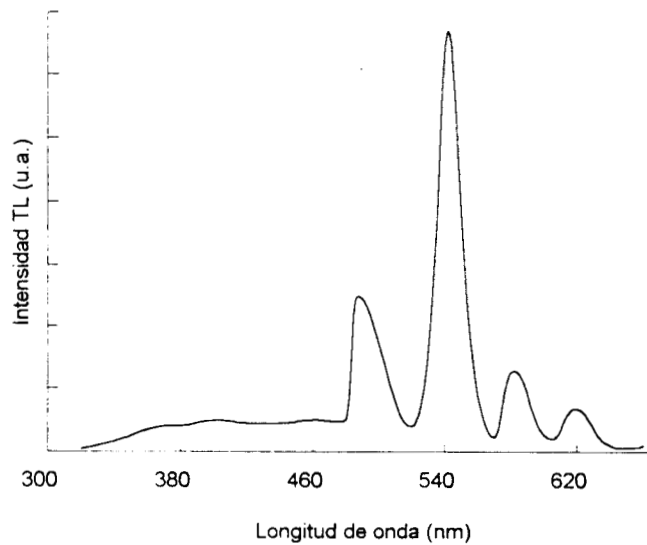
El espectro fotoluminiscente de ZrO<sub>2</sub>:Eu previamente irradiado con UV al ser excitado con luz UV de 275 nm se puede constatar en la figura 19 en la que se pueden observar tres máximos a 588, 612 y 650 nm con la máxima emisión a 612 nm. Estas bandas corresponden a las transiciones características de la luminiscencia del ion Eu<sup>3+</sup>.





*Figura 19. Espectro fotoluminiscente de  $ZrO_2:Eu$  irradiado con UV y excitado con luz UV de 275 nm.*

En la figura 20 se muestra el espectro fotoluminiscente de  $ZrO_2:Tb$  excitado con luz de la misma longitud de onda. En este espectro se observan cuatro bandas de emisión en 487, 542, 582 y 619 nm las cuales corresponden a las transiciones características de la luminiscencia del ion  $Tb^{3+}$



*Figura 20. Espectro fotoluminiscente de  $ZrO_2:Tb$  excitado con luz UV de 275 nm.*

### e) Curva termoluminiscente

La figura 21 muestra la curva TL del  $ZrO_2:Tb$  obtenida al ser expuesto a la luz UV de 260 nm. Dicha curva presentó dos picos; a 112°C y 270°C; mientras que para  $ZrO_2$  activado con europio los presentó a 120°C y 290. Los picos que aparecen a 112 y 120 °C se desvanecen completamente a temperatura ambiente 24 h después de la exposición. Los picos que aparecen a 270 y 290°C son los considerados picos dosimétricos para nuestro estudio. La curva TL de  $ZrO_2$  activado con europio expuesto a luz UV de 260 nm se muestra en la figura 22.

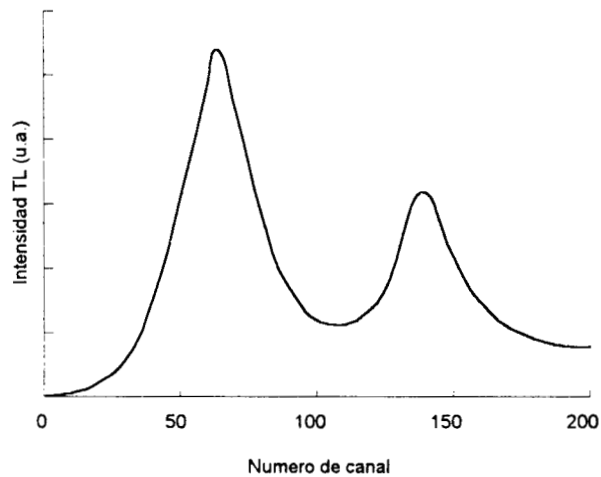


Figura 21. Curva TL del  $ZrO_2:Tb$  expuesto a luz UV de 260 nm.

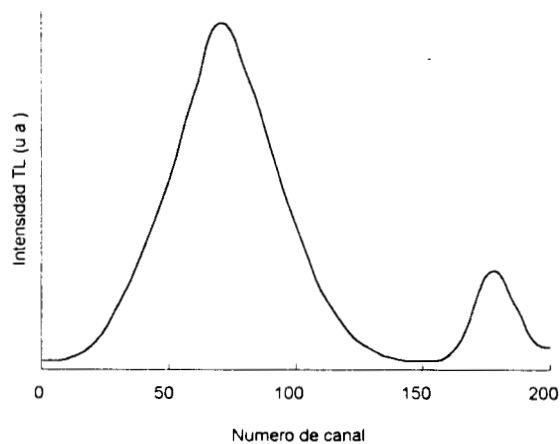


Figura 22. Curva TL del  $ZrO_2:Eu$  expuesto a luz UV de 260 nm.

Para todas las longitudes de onda entre 200 y 900 nm se obtiene la misma curva TL.

#### f) Respuesta TL en función de la longitud de onda

La respuesta TL del  $ZrO_2:Tb$  en función de la longitud de onda presenta cinco máximos. El primero a 210 nm, el segundo a 230 nm, el tercero de mayor intensidad aparece a 260 nm, el cuarto que se presentó a 320 nm y el quinto a 500 nm. En la figura 23 se muestra gráficamente la curva en función de la longitud de onda para este material.

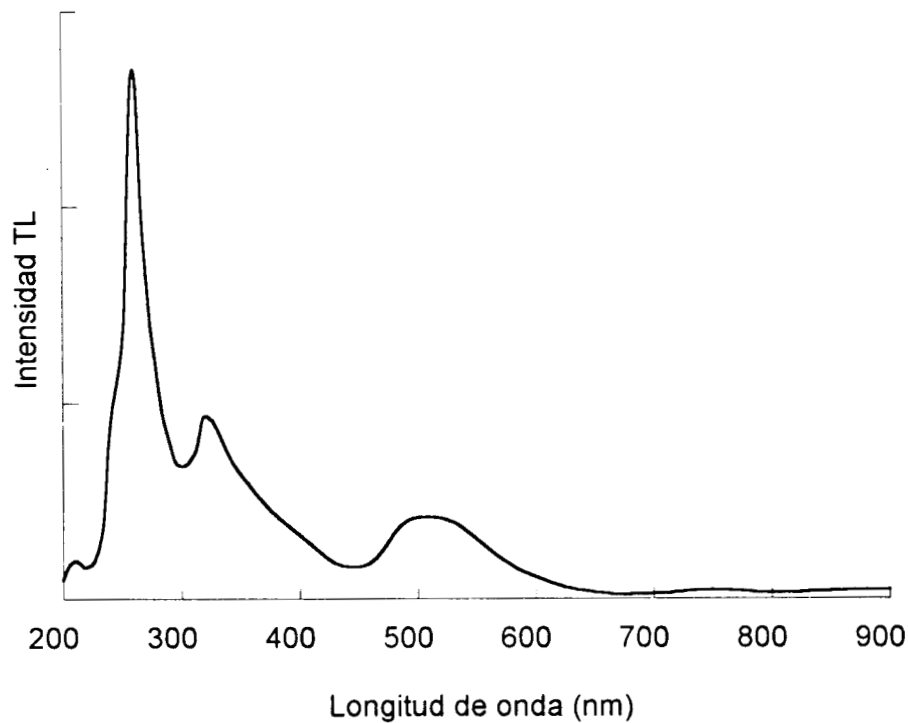
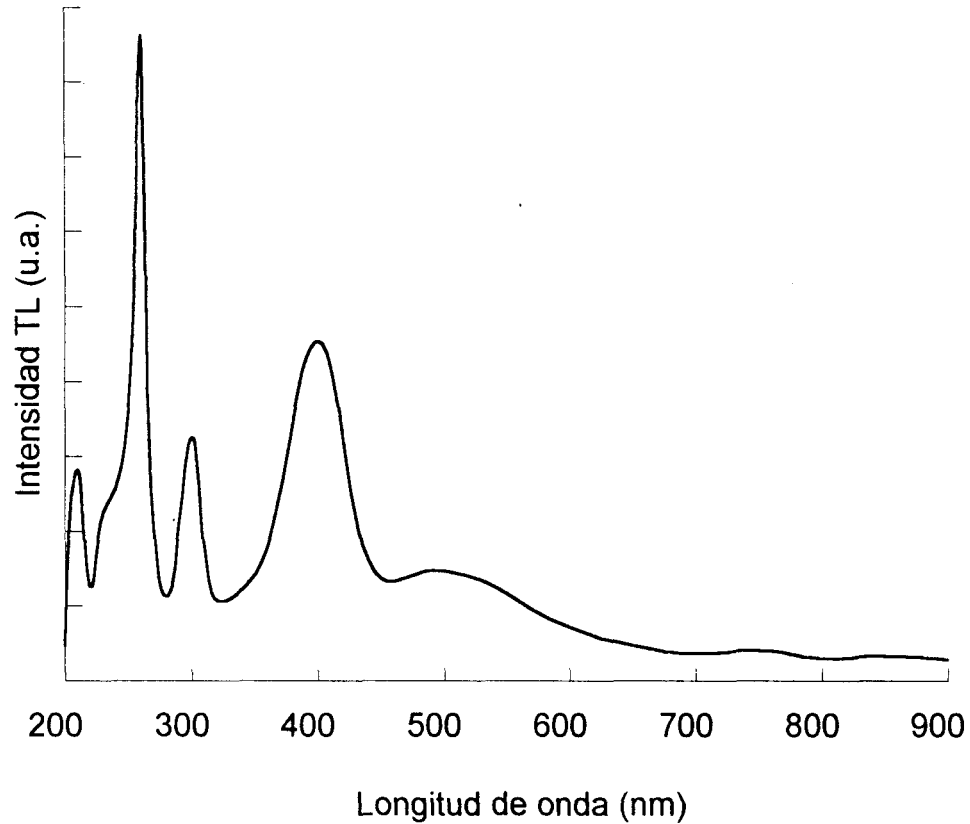


Figura 23. Respuesta TL del  $ZrO_2:Tb$  en función de la longitud de onda en el intervalo de 200 - 900 nm.

La respuesta TL del  $ZrO_2:Eu$  en función de la longitud de onda presentó seis máximos en el intervalo de 200 a 900 nm; a 210, 230, 260, 300, 400 y 510 nm siendo el pico de máxima intensidad, el que aparece a

260. En la figura 24 se presenta la curva TL con los picos representativos para este material.



*Figura 24. Respuesta TL del  $ZrO_2:Eu$  en función de la longitud de onda en el intervalo de 200 - 900 nm.*

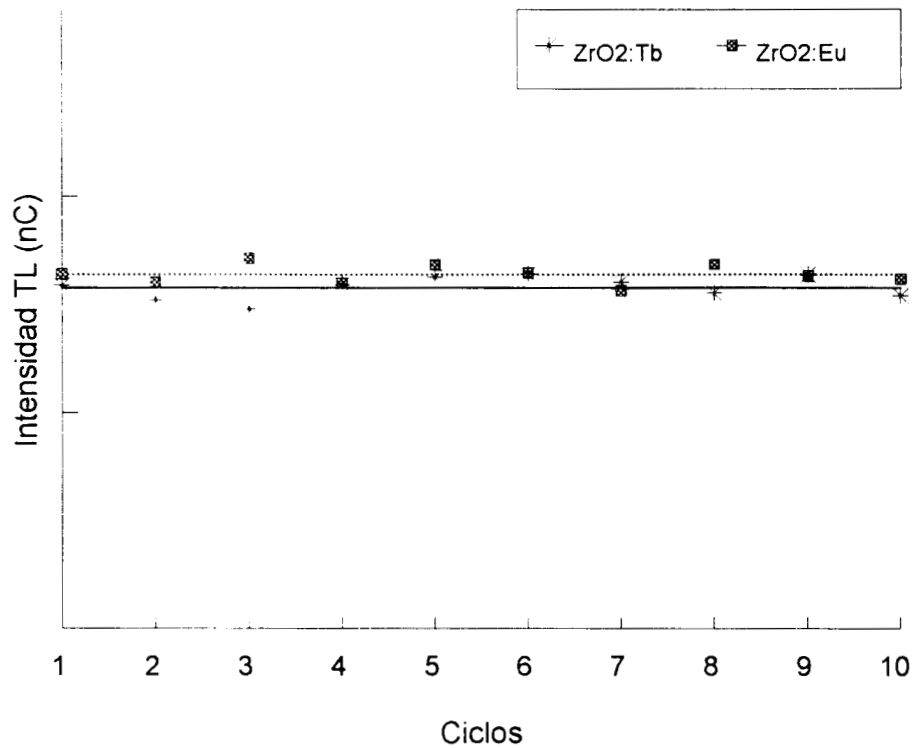
#### **g) Reproducibilidad**

La reproducibilidad del óxido de zirconio activado con tierras raras resultó buena para nuestro estudio. El material de  $ZrO_2:Tb$  presentó una desviación estándar de 3.1 % y para el  $ZrO_2$  activado con europio presentó una desviación estándar de 2.6 % de las lecturas tomadas hasta 10 veces.

Los resultados se muestran en la tabla XVI y se pueden observar gráficamente en la figura 25.

**Tabla XVI. Reproducibilidad del ZrO<sub>2</sub>:TR expuesto a luz UV**

	Ciclo										
Muestra	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	% DS
ZrO <sub>2</sub> :Tb	12.73	12.20	11.80	12.77	13.04	12.36	11.27	12.86	12.45	13.12	3.1
ZrO <sub>2</sub> :Eu	13.15	12.82	13.73	12.82	13.50	13.20	12.53	13.51	13.08	12.97	2.6



*Figura 25. Reproducibilidad de la respuesta TL del ZrO<sub>2</sub>:TR expuesto a luz UV a una longitud de onda de 260 nm*

#### **h) Linealidad**

La respuesta TL del ZrO<sub>2</sub>:TR a una longitud de onda de 260 nm es lineal para diferentes tiempos de exposición. Los datos se muestran en la tabla XVII y esquemáticamente en la figura 26.



Tabla XVII. Respuesta de materiales TL a diferentes tiempos de exposición

Tiempo (seg.)	Intensidad TL (nC)		Irradiancia espectral ( $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
	ZrO <sub>2</sub> :Tb	ZrO <sub>2</sub> :Eu	
10	4.61	4.77	24
20	8.44	8.08	48
30	12.97	12.87	72
40	16.27	17.86	96
50	19.28	20.99	120
60	22.01	26.42	144
70	13.07	29.07	168
80	26.21	33.01	192
90	30.39	36.82	216
100	34.26	39.45	240

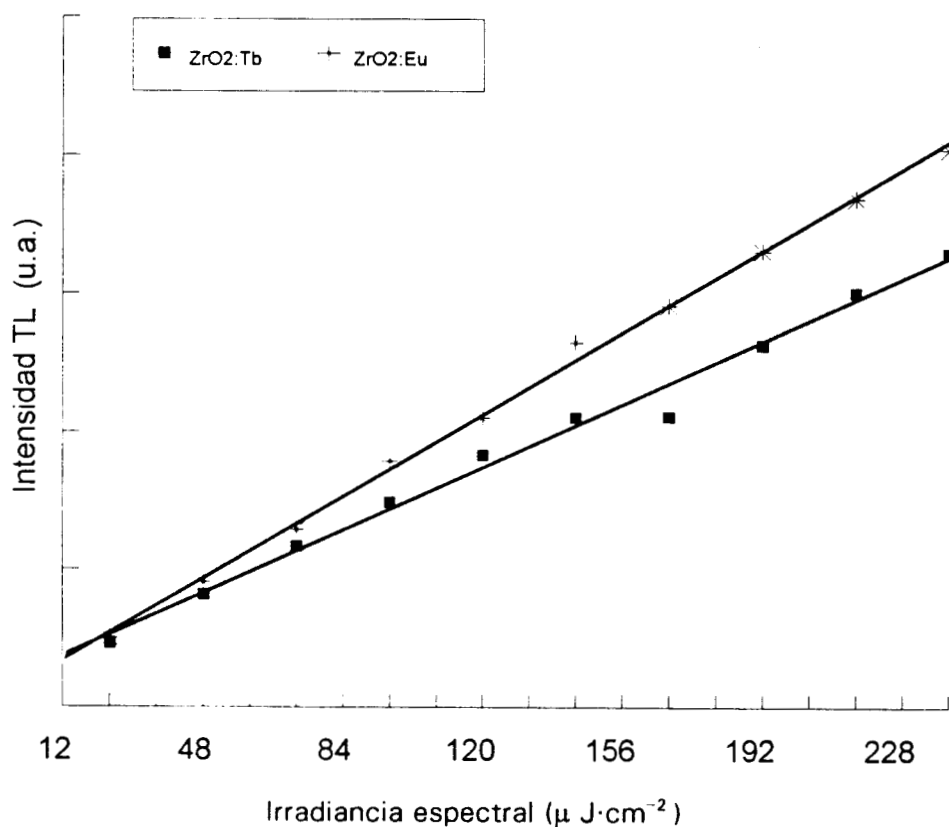


Figura 26. Respuesta TL de ZrO<sub>2</sub>:TR en función de la dosis de exposición

## Parámetros cinéticos

Para la determinación del número de picos involucrados en el modelo se procedió primeramente, determinar de manera visual sobre la gráfica (curva TL) de los datos experimentales los picos bien definidos (posición y altura); posteriormente se procedió hacer el ajuste con este número de picos. En segundo lugar, se hace la gráfica de los datos experimentales junto con el ajuste obtenido, se observan las discrepancias y en una de esas regiones se agrega un pico; se vuelve hacer el ajuste con estos nuevos picos. Se reitera este proceso hasta lograr un buen ajuste.

Las cotas inferiores y superiores para las  $T_m$  se obtuvieron del intervalo de las temperaturas de nuestros datos experimentales. Con respecto a los valores del orden de la cinética ( $b$ ) están entre uno y dos. Por último para las energías  $e$  se sabe que se encuentran entre 0.5 y 4 (o menos).

En la tabla XVIII se resumen los parámetros utilizados para la realización de la deconvolución, mientras que en la tabla XIX se presentan los resultados obtenidos para las muestras del  $ZrO_2:Eu$ . En la figura 27 se muestra una curva representativa en la que se ha aplicado el método de deconvolución.

### Notaciones de los parámetros utilizados

- $T_o$  = Temperatura inicial (K)
- TMAX = Temperatura final (K)
- TADQ = Tiempo de adquisición de la lectura
- $q$  = Rapidez de calentamiento
- $\alpha, \beta, \gamma$  = Fondo
- $T_m$  = Temperatura máxima de cada pico
- $I_m$  = Intensidad TL máxima de cada pico
- $b$  = Orden de la cinética
- $e$  = Energía de activación (eV)
- $s$  = Factor de frecuencia ( $s^{-1}$ )
- $n_o$  = Número de electrones atrapados
- $s'$  = Factor preexponencial ( $cm^{3(b-1)} \cdot s^{-1}$ )
- Eu = Dosímetro TL de  $ZrO_2$  activado con europio

Tabla XVI. Estimación inicial de los parámetros

DTL	T <sub>0</sub>	TMAX	TADQ	q	α	β	γ	pico	T <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	b	e
Eu	323	673	130	5	0.0	0.0	0.0	1	353.5	110	1.65	0.70
								2	414.7	120	2.00	0.79
								3	566.3	100	2.00	1.53
								4	632.5	140	2.00	2.12
Tb	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	1				
								2				

Tabla XVII. Solución final aproximada

DTL	α	β	γ	FO	pico	T <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	b	e	s	n <sub>0</sub>	s
Eu	5.1E <sup>-36</sup>	2.89	1.2E <sup>-1</sup>	724	1	353.49	85.13	1.01	0.50	6.22E <sup>+7</sup>	50.35	5.97E <sup>+7</sup>
					2	409.57	118.64	2.00	0.75	6.41E <sup>+9</sup>	95.90	6.69E <sup>+7</sup>
					3	55.49	64.07	2.00	2.69	2.24E <sup>+25</sup>	27.95	8.03E <sup>+23</sup>
					4	629.35	140.00	1.01	1.10	1.73E <sup>+9</sup>	123.13	1.65E <sup>+9</sup>
Tb					1							
					2							

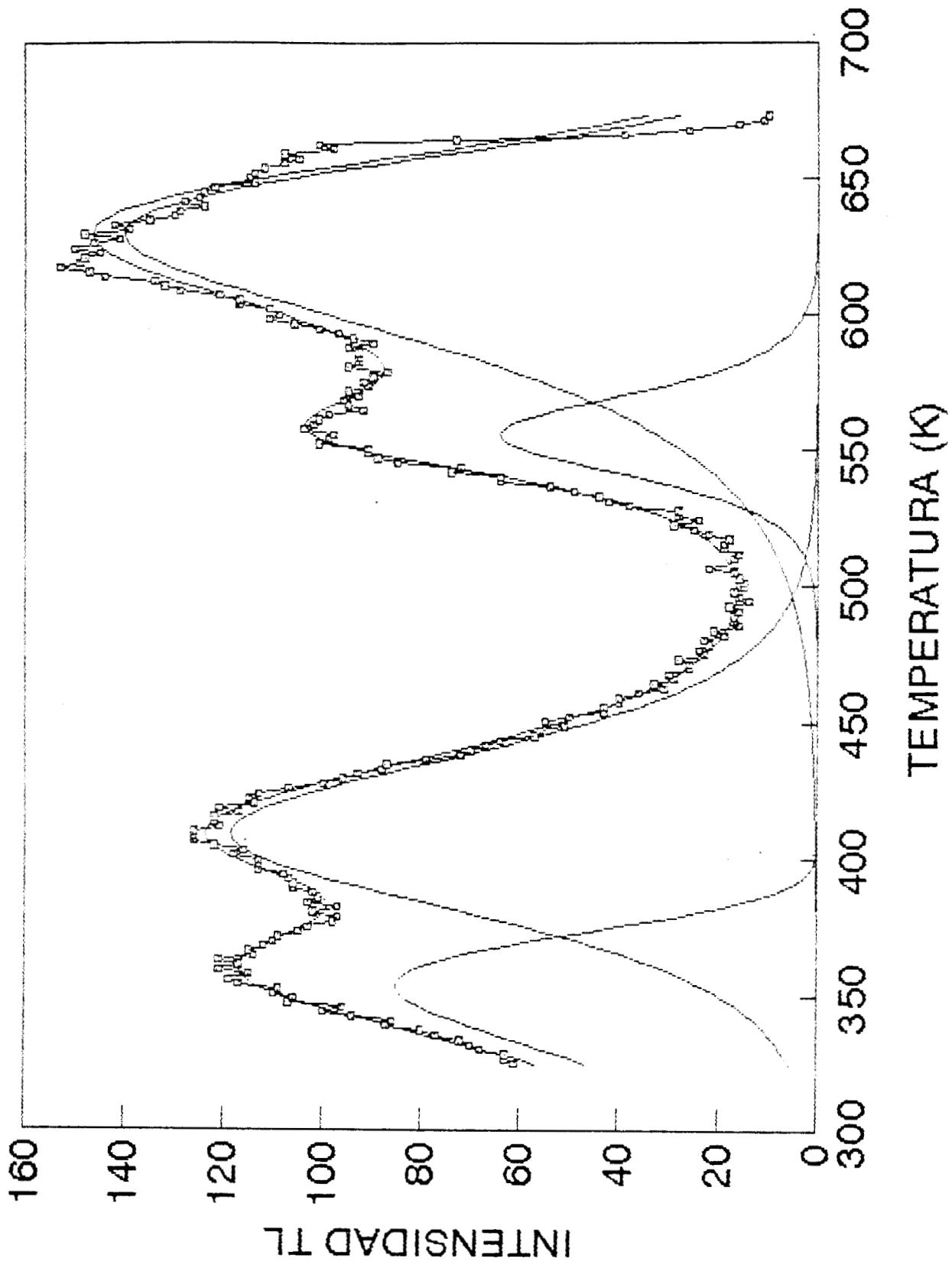


Figura 27. Espectro de deconvolución de la curva del  $ZrO_2:Eu$

## **CONCLUSIONES**



## CONCLUSIONES

Con respecto a las características estudiadas para los dosímetros Termoluminiscentes de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  se puede concluir que es un material TL adecuado para la dosimetría de la luz UV/VIS.

Para el fenómeno de la fototransferencia estudiada en  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ , se considera que las microondas generan modificaciones en la constante de red y un reacondicionamiento de las trampas y activadores en los materiales.

La respuesta TL del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  es dependiente de la energía de la radiación incidente.

Después de haber analizado las características dosimétricas del  $\text{ZrO}_2$  activado con tierras raras podemos concluir que, la respuesta TL depende fuertemente de la concentración del activador.

La temperatura de depósito de la película de  $\text{ZrO}_2\text{:TR}$  sobre el sustrato juega un papel importante en la respuesta TL.

La fotoluminiscencia del  $\text{ZrO}_2$  activado con terbio tiene su dependencia en las transiciones dipolares características del ion  $\text{Tb}^{3+}$ . Mientras que la fotoluminiscencia del  $\text{ZrO}_2$  activado con europio depende fuertemente de las transiciones dipolares del ion  $\text{Eu}^{3+}$ .

La estructura del  $\text{ZrO}_2\text{:TR}$  radica su dependencia en la temperatura de recocido, (tratamiento térmico posterior al depósito de la película).

El tratamiento térmico óptimo de borrado influye en la respuesta TL de los materiales en estudio.

Como conclusión global podemos decir que los materiales desarrollados en forma de película en sustratos de vidrio y de cuarzo tienen potencial para ser usados como dosímetros TL en la dosimetría personal y ambiental de la luz UV y visible, en el espectro de radiación electromagnética comprendida en el intervalo entre 200 y 900 nm.

---

## **BIBLIOGRAFIA**



## Bibliografía

- 1 Diffey B.L. Ultraviolet Radiation Physics and the Skin. *Phys. Med. Biol.* **25**, 405-426 (1980)
  - 2 Imos Fluorocarbonos and the Environment, Report of Federal Task Force on Inadvertent Modification of the Stratosphere, Imos, Washington D.C, Council on Environment Quality, 1975.
  - 3 Wiedemann E. And Schmidt G.C. Ueber Luminiscenz, *Ann. Phys. Chem. Neue. Folge*, **54** 604(1895).
  - 4 Puite K. J. The effect of Ultraviolet exposure in thermoluminescent CaF<sub>2</sub>:Mn *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes* **19** 397-402 (1968)
  - 5 Dhar A., Dewerd L.A. and Stoebe T.G. Direct-Response Ultraviolet Thermoluminescent Dosimeter. *Medical Physics* **3**, 415-417 (1976)
  - 6 Nagpal J.S. Ultraviolet Dosimetry Using Thermoluminescence Phosphors-Rate Dependence. *Radat. Effects Letters.* **43** 173 - 178 (1979).
  - 7 Marwaha G.L., Singh N., Vij D.R. and Mathur V.K. UV Dosimetry by Thermoluminescence of Bismuth Doped CaS. *Journal of Physics C: Solid State Physics* **13** 1559-1563 (1980).
  - 8 Bassi P. UV Dosimetry by Intrinsic TL of CaF<sub>2</sub>:Dy, *Health Phys.* **31** 179-182, (1976).
  - 9 Azorín J., Rubio J, Gutiérrez A., González P. And Rivera T. Dosimetric Characteristics and Glow Curve Kinetics Analysis of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Thermoluminescence Detectors. *J. Thermal Anal.* **39** 1107-1116 (1993).
  - 10 Shan-Chou Chang and Ching-Shen Su. Direct Thermoluminescence of sintered ZrO<sub>2</sub> Pellets induced by Ultraviolet Radiation. *Nucl. Traks Radiat. Meas.* **20** (3) 511-516 (1992).
  - 11 Randall J.T. and Wilkins N.F.H. Phosphorescence and Electron Traps. *Proc. Roy. Soc.* **184A** 365 (1945).
  - 12 Horowitz Y.S. Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry (CRC Press, Inc., Boca Raton), (1984).
  - 13 Halperin A. And Braner A.A. Evaluation of thermal Activation Energies from Glow Curves. *Phys. Rev.* **47** 649 (1960).
-



- 14 Chen R. On The Calculation of Activation Energies and Frequency Factors From Glow Curves. *J. Appl. Phys.* **40** 570 (1969).
  - 15 Balarin M. Direct Evaluation of E from Half-Width of Glow Peaks and Special Monogram. *Phys. Stat. Sol.* **31** k111 (1975)
  - 16 Chen R. Glow Curves With General Order Kinetics *J. Elcetrochem. Soc.* **166** 1254 (1969).
  - 17 Randall J.T. and Wilkins N.F.H. Phosphorescence and Electron Traps. *Proc. Roy. Soc.* **184A** 365 (1945).
  - 18 Azorín J. Dosimetría Termoluminiscente. Cuadernos del ININ Serie de Divulgación-Técnico-Científico (1988)
  - 19 Diffey B. L. Possible errors involved in the dosimetry of solar UV-B radiation stratospheric Ozone Reduction, Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life 715-20 (1986)
  - 20 Worrest R.C. The effect of solar UV-B radiation on aquatic systems: an Overview Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate Vol. I De. JG. Tifus (Washington D.C.) Environmental Protection Agency and United Nations Environmental Program 775-791 (1986).
  - 21 Castellani A. Research in Photobiology, Plenum Press, N.Y. 579 (1977)
  - 22 Diffey B.L. Solar Ultraviolet Radiation Effects on Biologycal Systems Review in Physics in Medicine and Biology **36** 199-328 (1991)
  - 23 American Association of Ophtalmology. The Ocular Hazards of UV Exposure (1993)
  - 24 Patrick N.H. and Rahn R.O. Photochemistry of DNA and Polynucleotides Photoproducts. Photochemistry and Photobiology of Nucleic Acids , N.Y. Academic II 35-95 (1976)
  - 25 Webb A.R., Kline L.W. and Holick M. F. Influence of Season and Latitude on the Cutaneous Synthesis of Vitamin D<sub>3</sub>. *Skin. J. Clin. Endocrinol. Metb.* **67** 337-8 (1988).
  - 26 Hughes D. Notes on Protection Against Laser Radiation in the Laboratory, Radiation Protection Adviser and Head of the Radiation Protection Service . The University of Leeds, U.K. **10** (1994).
-

- 27 Bruls N.A.G., Slaper H., Van der Leun J.C. and Berrins L. Transmission of Human Epidermis and Stratum Corneum is a Function of Thickness in the Ultraviolet and Visible Wavelengths. *Photoch. Photobiol.* **40** 485-94 (1984).
  - 28 Clemens T. L., Adams J., Henderson S. and Holick. Increased Skin Pigment Reduces the Capacity of Skin to Synthesize Vitamin D<sub>3</sub>. **1** 74-6 (1982)
  - 29 Webb A., De Costa B. and Holick M.F. Sunlight Regulates the Cutaneous Production of Vitamin D<sub>3</sub> by Causing its Photodegradation **68** 882-7 (1989)
  - 30 Pitts D., Cullen A.P. and Parr W. Ocular Ultraviolet Effects from 295 nm to 335 nm in the Rabbit Eye. Washington, D.C: US Department of Health, Education (NIOSH) (1976).
  - 31 Taylor H. The Biological Effects of UV-B on the Eye. *Photochem. Photobiol.* **50** 489-92 (1989)
  - 32 United Nations Environment Programme, World Health Organization (WHO), IRPA1979. Environment Health, Criteria **14**, Ultraviolet Radiation (Geneva:WHO).
  - 33 Guidelines on limits of Exposure To Ultraviolet Radiation of Wavelengths Between 180 and 400 nm (Incoherent Optical Radiation). The International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee.(IRPA/NIRC). *Health Phys.* **49** (2) 331-340, (1985).
  - 34 International Non-Ionising Radiation Committee (INIRC) of the International Radiation Protection Association (IRPA). Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields. **58**(1) 113-122 (1990).
  - 35 Youmans H.D. and Ho H.S. Development of Dosimetry for RF and Microwave Radiation-1 Dosimetric Quantities For RF and Microwave Electromagnetic Fields. *Health Phys. Pergam Press* **29** 313-316 (1975).
  - 36 Youmans H.D. and Ho H.S. Development of dosimetry RF and Microwave Radiation II. Dose Rate Distribution in Tissue Spheres Due to Measurement Spectra of Electromagnetic Plane Wave. **29** 325-329 (1975).
  - 37 Azorín J. La luz Ultravioleta. Sus Riegos y Dosimetría. *Contactos* **9** 35-41 (1995).
  - 38 Azorín J. Determination of Thermoluminescence Parameters from Glow Curves. A Review. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part. D: Nucl.Tracks* **11**(3) 159 (1986).
-

- 39 Azorín J. Luminescence Dosimetry Theory and Applications (Ed. Técnico Científicas, S.A. de C.V., primer edición (1990).
  - 40 Urbach E. Luminescence of Alkali Halides Sber. Akad. Wiss. Wien. Abt. IIa **139** 363 (1930).
  - 41 Hoogenstraaten W. Electron Traps in Zinc Sulphide Phosphors. Philips Res. Rept. **13** 315 (1958).
  - 42 López E. Ajuste del Modelo de Chen de Orden Cinético General Aproximado a la Podgorsak a Datos Experimentales de Dosímetros TL. Informe Técnico-Científico No. DSICG1-03-94/A, ININ (1994).
  - 43 Horowitz Y.S., Moscovitch M. And Oduko J. LiF TLD Via Computerized First Order Kinetics Glow Curve Analysis. Radiat. Prot. Dosim. **6**(1) 157 (1986).
  - 44 Horowitz Y.S., Moscovitch M and Wilt M. Computerized Glow Curve Deconvolution Applied to Ultra Low LiF TLD. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A244** 556 (1986).
  - 45 Chen R. Kinetics of Thermoluminescence Glow Peaks In: Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry (Ed Y.S. Horowitz, CRC Press. Boca Raton), (1984).
  - 46 Haake C. Critical Comment on a Method for Determining Electron Trap Depths. J. Opt. Soc. Am. **47** 649 (1957).
  - 47 Azorín J., González G., Gutiérrez A. and Salvi R. Preparation and Properties of a Highly Sensitive CaSO<sub>4</sub>:Dy Thermoluminescent Dosimeter. Health Phys. **46**(2) 269 (1984)
  - 48 Cameron J., Suntharalingam N., Wilson C. and Watanabe S. Supralinearity of Thermoluminescent Phosphors. Proc. 2nd Int. Conf. Lumin. Dosim. Gatlinburg (1968).
  - 49 Rivera T. Estudio y Determinación de las Propiedades Termoluminiscentes de un Nuevo Dosímetro de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C. Tesis de Licenciatura en I.Q. Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
  - 50 Riecke j.K. and Daniels F. Thermoluminescence Studies of Aluminium Oxide. J. Phys. Chem. **61**(5) 629-633 (1957)
  - 51 Buckman W.G. Aluminum Oxide Thermoluminescence Properties For Detection Radiation. Health Phys. **22**(4) 402-402 (1972).
  - 52 Mc Dougall R.S. and Rudin S. Thermoluminescence Dosimetry of Aluminium Oxide Healt Phys. **19** 281-283 (1970).
-

- 53 Osvay M. And Biro T. Aluminium Oxide in TL Dosimetry. Nucl. Instrum. Methods. **175** 60-61 (1980).
  - 54 Mehta S.K. and Segupta S. Gamma Dosimetry with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TL Phosphor. Phys. Med. Biol. **21**(6) 955-964 (1976)
  - 55 Akselrod M.S., Kortv V.S., Kravetsky D.J and Gotlib V.I. Highly Sensitive Thermoluminescent Anion-Defective  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Single Crystal Detectors. Radiat. Prot. Dosim. **32**(1) 15-20 (1990).
  - 56 Akselrod M.S., Kortv V.S., Kravetsky D.J and Gotlib V.I. Highly Sensitive Thermoluminescent Anion-Defective  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Single Crystal Detectors. Radiat. Prot. Dosim. **33**(1/4) 119-122 (1990).
  - 57 Azorín J., Rivera T., Martínez E. and García M. Thermoluminescence of Eu-Doped ZrO<sub>2</sub> Thin Films Exposed to Ultraviolet and Visible Light. 3rd International Symposium Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation "LUMDETR '97" (1997).
  - 58 Hsieh W.C. and Su C.S. UV Induced Thermoluminescence in ZrO<sub>2</sub> Doped by Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Journal of Physics D: Applied Physics **27** 1763-1768 (1994).
  - 59 López E.J. Ajuste del Modelo de Chen de Orden Cinético General, Aproximado a la Podgorsak, a Datos Experimentales de Dosímetros TL. Informe Técnico-Científico DSICGI-03-94/A, ININ (1994)
-

## AGRADECIMIENTOS

Mi mayor gratitud y reconocimiento al Dr. Juan Azorín Nieto por la dirección de esta tesis, así como su valiosa amistad

Hago patente mi agradecimiento al M. en C. Pedro González Martínez por su apoyo incondicional durante la realización de este trabajo

Agradezco a los físicos Enrique Martínez Sánchez y Manuel García Hipólito en la preparación de las muestras

Agradezco al Sr. Miguel Vázquez Villa por su valioso apoyo técnico

A mis amigos que de alguna forma participaron con sus sugerencias para el buen desarrollo del trabajo.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo en la participación dentro del programa de becas de posgrado

---