



DOSÍMETROS INTEGRADORES

Pablo Andres
andresp@cab.cnea.gov.ar

División Protección Radiológica
2016



CONTENIDO



- Dosimetría termoluminiscente
- Dosimetría por estimulación óptica
- Dosimetría fotográfica
- Dosimetría radiocrómica
- Dosimetría química
- Dosimetría de gel
- Dosimetría calorimétrica
- Calibración
- Usos típicos
- Ventajas y desventajas



DOSIMETRÍA



- La **dosimetría** de radiación es el cálculo de la **dosis absorbida** en tejidos y materia como resultado de la exposición a la radiación ionizante, tanto de manera directa como indirecta.
- Dosis absorbida

$$D = \frac{dE_T}{dm} \quad [Gy] = [J/kg]$$



donde dE_T es la energía total impartida en un tejido, órgano o materia de masa dm .

DOSIMETRÍA



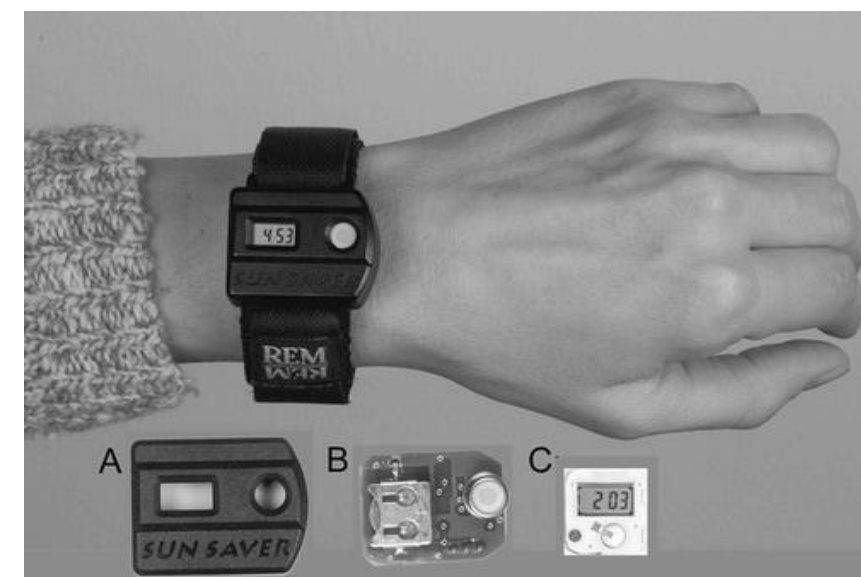
Clasificación de la dosimetría según su campo de aplicación

- **Dosimetría personal**, cuyo objetivo es cuantificar niveles bajos de dosis, es decir, los que corresponden a personas expuestas y al público en general, niveles que nunca serán superiores a unos pocos mSv por año.
- **Dosimetría clínica**, que trata de evaluar niveles medios de dosis o aquellos que afectan al uso de la radiación como fuentes de energía para diagnóstico y terapia, siempre inferiores a 10 Gy aprox.
- **Dosimetría industrial**, cuyo campo es mucho más amplio y donde entran en juego mayores rangos de dosis, como los que intervienen en control de calidad, radioesterilización de alimentos, envases, material quirúrgico. El rango de dosis va desde unos 80 Gy hasta unos 1500 Gy.

DOSIMETRÍA



- Un **dosímetro** es un instrumento de medición de dosis absorbida.
- Un **dosímetro integrador** es un instrumento que mide la dosis absorbida acumulada en un cierto período de tiempo.



DOSIMETRÍA QUÍMICA



- La energía absorbida puede producir cambios químicos en el medio absorbente y la cuantificación de estos cambios permite medir la dosis.
- La dosimetría química se basa en el dosímetro de Fricke, que depende de la oxidación de una solución ácida acuosa de sulfato ferroso a sulfato férrico.
- La cantidad de iones férricos puede medirse por espectrometría de absorción, pues la luz UV (~ 304 nm) es fuertemente absorbida por un ion férrico.



DOSIMETRÍA QUÍMICA



Características del sistema

- Respuesta independiente de la energía de la radiación.
- Características de absorción equivalentes a las del agua.
- Relación lineal entre el grado de avance de la reacción y dosis absorbida.
- Gran rango de dosis.
- Buena precisión y reproducibilidad.
- Respuesta independiente de las condiciones ambientales.
- Independiente de impurezas.
- Mecanismo de reacción bien definido.
- Estabilidad del sistema antes y después de la irradiación.
- Simplicidad de empleo.



DOSIMETRÍA QUÍMICA



Valor **G**

- El rendimiento (*yield*) químico de la radiación se expresa como el número de moléculas de producto producido por cada 100 eV de energía absorbida.
- Sea una muestra de sulfato ferroso,

$$G = \Delta M / D \cdot \rho$$

ΔM : concentración [moles/litro]

ρ : densidad [kg/m³]

D: dosis

D· ρ : energía absorbida

DOSIMETRÍA QUÍMICA

Cálculo de la dosis, **D**



$$D = \Delta M / G \cdot \rho$$

Para obtener la dosis D en gray, se deben convertir los moles a número de moléculas, m^3 a litros y eV a joules:

$$D = 9,65E9 \cdot (\Delta M / G \cdot \rho)$$



DOSIMETRÍA QUÍMICA



Determinación de la cantidad de ion férrico producido

Puede ser determinada midiendo la densidad óptica de una solución irradiada y comparándola con aquella de una solución no irradiada. La absorbancia A o densidad óptica de una solución se define como:

$$A = \log(I_o/I_t)$$

I_o : Intensidad de luz incidente impactando en una celda de cuarzo que contiene la solución.

I_t : Intensidad de la luz transmitida.

DOSIMETRÍA QUÍMICA



Determinación de la cantidad de ion férrico producido

$$A_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot l \cdot M$$

l: longitud de camino de la celda [cm]

M: concentración de especies absorbentes en la solución [moles/litro]

ε_{λ} : constante de proporcionalidad “coeficiente de extinción molar” [litros/moles·cm]

A_{λ} : absorbancia [adimensional]



DOSIMETRÍA QUÍMICA



Cálculo de la dosis absorbida, D

$$D = 9,65 \times 10^9 \left(\frac{\Delta A_\lambda}{\epsilon_\lambda l \rho G} \right)$$

ΔA_λ : cambio en la absorbancia en λ debido a una dosis D en el sulfato ferroso.

ϵ_λ : coeficiente de extinción molar del ion ferroso [2196 ± 5 litros/moles·cm a 304 nm]

ρ : densidad de la solución [kg/m^3]

G : rendimiento en número por cada 100 eV.

D : dosis absorbida [Gy]

DOSIMETRÍA QUÍMICA

Valores de G



Valores recomendados de G para la producción de ion férrico en 0,4 mol/litro de H_2SO_4 como función de la energía de los fotones.

Fuente: ICRU # 14 y 21

Radiación	G (nro./100 eV)
Cs-137	$15,3 \pm 0,3$
2 MV	$15,4 \pm 0,3$
Co-60	$15,5 \pm 0,2$
4 MV	$15,5 \pm 0,3$
5 -10 MV	$15,6 \pm 0,4$
11 – 30 MV	$15,7 \pm 0,6$



DOSIMETRÍA QUÍMICA



Ejemplo de cálculo de dosis

Determinar la dosis promedio en una muestra de agua en un contenedor cerca de una fuente de Co-60. El contenedor está lleno con una solución Fricke y expuesto a la radiación. Una muestra de una solución irradiada y bien mezclada se coloca en una cubeta de cuarzo de 2 cm de longitud y su absorbancia medida contra una solución a 304 nm. Suponga que la absorbancia medida es 0,360.

$$D = 9,65 \times 10^9 \left(\frac{\Delta A_\lambda}{\epsilon_\lambda l \rho G} \right)$$

$$D = 9,65 \times 10^9 \left(\frac{0,360}{2196 \cdot 2 \cdot 1024 \cdot 15,5} \right) = 49,8 \text{ [Gy]}$$

$$D_{agua} = D \cdot \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{agua}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{FeSO_4}} = 49,8 \cdot \frac{0,0297}{0,0296} = 49,9 \text{ [Gy]}$$



DOSIMETRÍA QUÍMICA



El dosímetro de Fricke

- Es un dosímetro químico. A partir de cambios químicos en la materia producidos por la interacción con la radiación ionizante que le incide, permite cuantificar directa o indirectamente la energía absorbida en el medio.
- El principio de funcionamiento del dosímetro de Fricke consiste en la conversión del ion ferroso (Fe^{2+}) en ion férrico (Fe^{3+}), a partir de la energía depositada en el medio en cuestión, por la radiación ionizante incidente.
- La concentración de Fe^{3+} dependerá de la dosis total absorbida D_T por la solución.
- Solución base del dosímetro de gel Fricke: agua ultra pura, ácido y óxido ferroso. Incorporada en una matriz de gel obtiene consistencia.



DOSIMETRÍA QUÍMICA



Ventajas y desventajas

- Las soluciones acuosas tienen un Z_{eff} y (μ_{en}/ρ) cercanos a los del agua, los cuales son similares a los del tejido humano para el rango de energías de interés.
- Los dosímetros líquidos pueden ser irradiados en contenedores de forma y volumen similares a los del objeto estudiado.
- Es posible obtener una dosimetría absoluta, por lo menos el sistema de sulfato ferroso de Fricke.
- Diferentes dosímetros químicos pueden utilizarse para cubrir un amplio rango de dosis (0,1 – 10E8 Gy).
- Linealidad vs dosis se encuentra en algunos dosímetros químicos en limitados rangos útiles de dosis.
- Falta de estabilidad en el almacenamiento impide la disponibilidad comercial, requiriendo mucho cuidado en el laboratorio, una desventaja importante.
- Sistemas individuales usualmente muestran cierto grado de dependencia con la tasa de dosis y la LET, como también con la temperatura de la solución durante la irradiación y el proceso de lectura.

DOSIMETRÍA CALORIMÉTRICA



Calorimetría

- Mide energía de una manera directa.
- La dosis absorbida en el volumen sensible del detector es proporcional al aumento de temperatura.

$$D_{\text{abs}} \propto \Delta T$$

- La principal desventaja es la necesidad de medir variaciones muy pequeñas de temperatura.



DOSIMETRÍA CALORIMÉTRICA



Medición de la temperatura

- Cualquier termómetro podría usarse como calorímetro si el cambio de temperatura es suficientemente grande para medirlo con exactitud y precisión: termocuplas; termistores.
- El aumento de temperatura por unidad de dosis absorbida en el volumen sensible del dosímetro depende de su capacidad térmica.
- Para un volumen sensible de un material cuya capacidad térmica es h (J/kg·°C), masa m (kg), y defecto térmico δ , y que absorbe E joules de energía, el aumento de temperatura viene dado por:

$$\Delta T = \frac{E(1 - \delta)}{hm} = \frac{\bar{D}(1 - \delta)}{h} \quad (^\circ\text{C})$$

Donde $\bar{D}$ es la dosis absorbida promedio (Gy) en el volumen sensible.



DOSIMETRÍA CALORIMÉTRICA



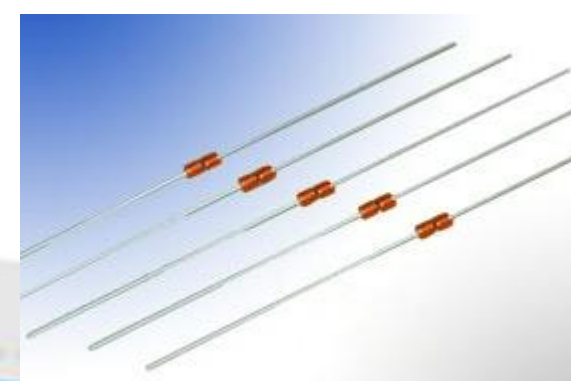
Termocuplas

- Coeficientes de temperatura típicos: $40\text{-}70\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
- Son útiles para medir altas dosis ($>10\text{Gy}$).
- La sensibilidad puede aumentar construyendo una termopila (termocuplas en serie).



Termistores

- Son semiconductores hechos con óxidos metálicos, con coeficientes de temperatura negativos.
- La resistencia de un termistor a temperatura ambiente es del orden $1\ \text{k}\Omega$ - $100\ \text{k}\Omega$.



DOSIMETRÍA CALORIMÉTRICA



Ventajas

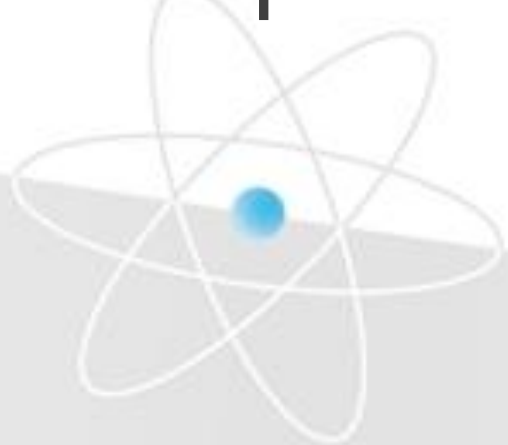
- Pueden ser dosímetros absolutos.
- La medición del aumento de temperatura se acerca más que cualquier técnica por ser una medida directa de la energía involucrada en la dosis absorbida. Solo relativamente pequeñas reacciones químicas endo y exotérmicas, y fugas térmicas, deben ser corregidas, pero a menudo son despreciables.
- Casi cualquier material absorbente, líquido o sólido, puede ser empleado en el volumen sensible, siempre que tenga una conductividad térmica razonable y un defecto térmico conocido.
- Son independientes de la tasa de dosis en condiciones adiabáticas y conviene usarlos cuando la tasa de dosis aumenta porque la fuga térmica durante la irradiación se hace despreciable. A altas tasas de dosis, donde la mayoría de los dosímetros se saturan, los calorímetros tienen su mejor comportamiento.
- No tienen dependencia con la LET, pues la recombinación iónica es irrelevante al aumento de temperatura.
- Son relativamente estables por daños debidos a la radiación a altas dosis; el termistor es usualmente el factor limitante.

DOSIMETRÍA CALORIMÉTRICA



Desventajas

- Los aumentos de temperatura a medir son típicamente muy pequeños, usualmente sólo una mínima fracción de grado, lo que limita la calorimetría a dosis relativamente altas.
- La aislación térmica y la instrumentación para el control y medición de la temperatura, a menudo hacen que el calorímetro sea aparatoso y difícil de transportar.
- Para bajas tasas de dosis, la fuga térmica hacia y desde el volumen sensible del calorímetro limita la exactitud y precisión alcanzables.
- Algunos materiales (p. ej.: plástico tejido-equivalente) sufren reacciones endo o exotérmicas inducidas por la radiación lo cual genera una diferencia entre la dosis integral y la energía disponible para calentar el volumen sensible.



DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA



Emulsión fotográfica

- El material sensible a la radiación ionizante está constituido por granos de bromuro de plata (BrAg) de dimensiones microscópicas y distribuidos en un medio gelatinoso, el cual está a su vez depositado como una capa de espesor muy delgado sobre un soporte traslúcido, por ejemplo, celuloide.
- Los electrones liberados por la radiación neutralizan al ion Ag^+ transformándolo en plata metálica, lo que constituye la formación de la imagen latente por pocos átomos de plata de un grano ($\sim 10^1$ Ag^+).
- La cantidad de granos de BrAg que han sufrido esta transformación, así como el número de iones de plata convertidos en cada grano, es función de la dosis absorbida.



DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA



Tipos de emulsión fotográfica

- Emulsiones para radiación X y γ : presentan un contenido de BrAg de 30-40% en peso. El tamaño del grano es de 1-2 μm de diámetro. Cada capa de emulsión es de 10-25 μm , y el espesor másico medio es de 2-5 mg/cm^2 . La emulsión se protege contra la abrasión mediante una delgada película de gel.
- Emulsiones nucleares que tienen aproximadamente el 70-80% en BrAg en peso, con un diámetro de grano del orden 0,3 μm . El espesor másico medio es de 1-200 mg/cm^2 para $\rho = 3,3 \text{ g}/\text{cm}^3$



DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA



Procesamiento

- **Revelado:** es un proceso químico de reducción que permite continuar la conversión de Ag^+ a Ag^0 . Manejando la cinética de la reacción química en función del tiempo y temperatura de la solución reveladora, se logra reducir a plata metálica los granos de BrAg , en forma selectiva, según el número inicial de átomos Ag^0 que formaban la imagen latente en cada grano.
- **Baño de retención del revelado:** la reacción se detiene al cabo de un tiempo de acción prefijado para una dada temperatura (solución diluida de ácido acético).
- **Solución de tiosulfato de sodio:** inmediatamente se somete la emulsión al denominado tratamiento de fijado. En este proceso se fijan los granos transformados a plata metálica y se utiliza para disolver los granos que no fueron totalmente transformados en plata metálica.
- Luego de un activo lavado con agua, para eliminar los compuestos químicos residuales de ambos procesos y secada la emulsión, se observan distintas tonalidades de grises (ennegrecimiento), según la dosis absorbida.

DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA



Medición

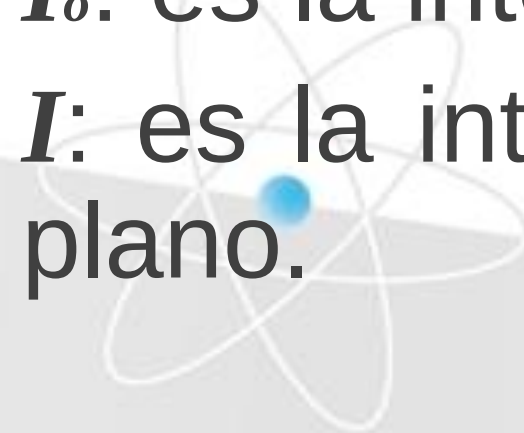
- La determinación del efecto de la radiación sobre la emulsión se basa en la medición del ennegrecimiento por medios densitométricos, que consiste en la determinación de la atenuación luminosa causada por la emulsión.

$$OD = \log \left(\frac{I_o}{I} \right)$$

donde:

I_o : es la intensidad de luz incidente medida en ausencia de la película.

I : es la intensidad de luz transmitida a través de la película en una dirección perpendicular a su plano.



DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA

Medición

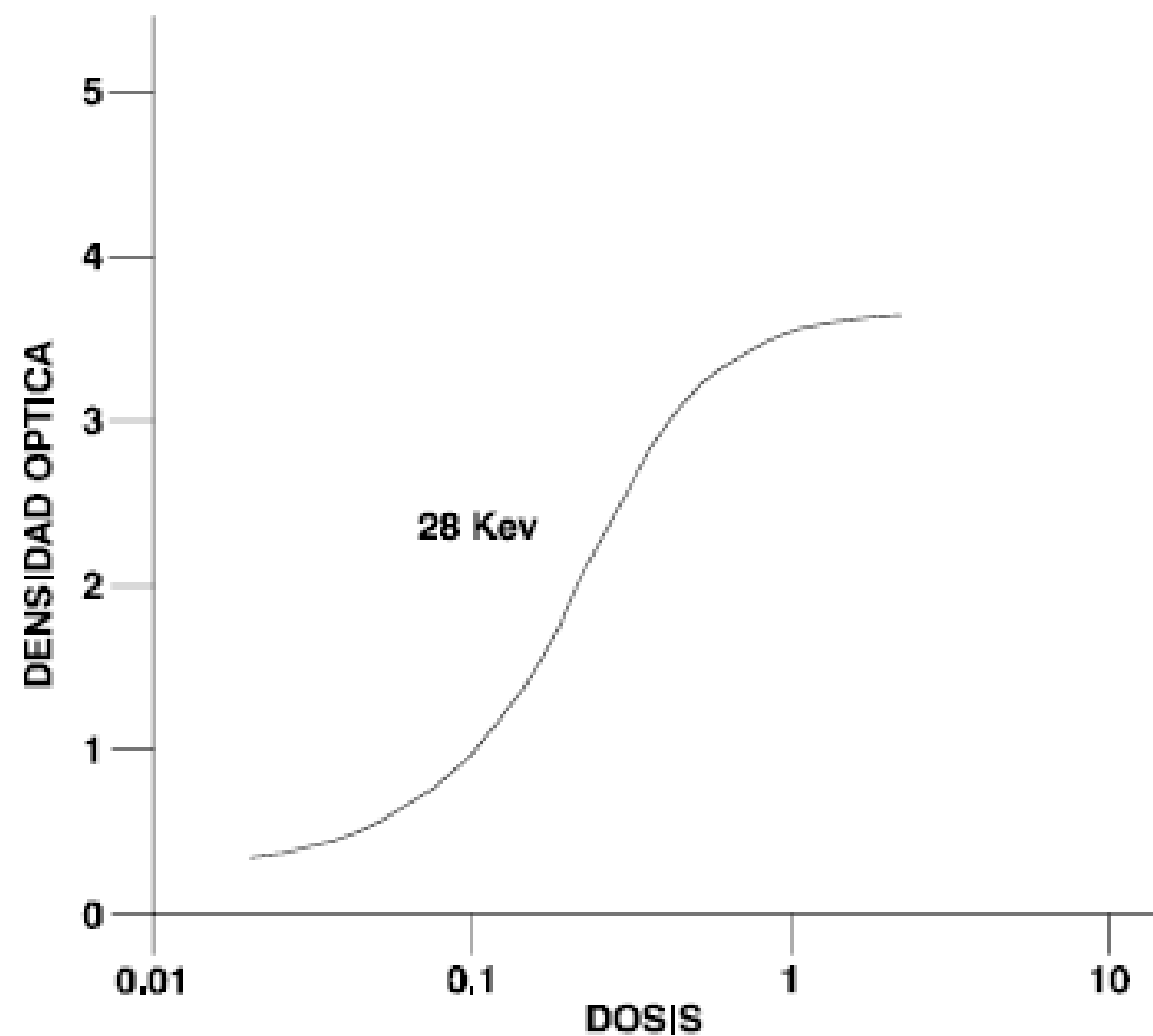


Fig.: Densidad óptica en función de la dosis.

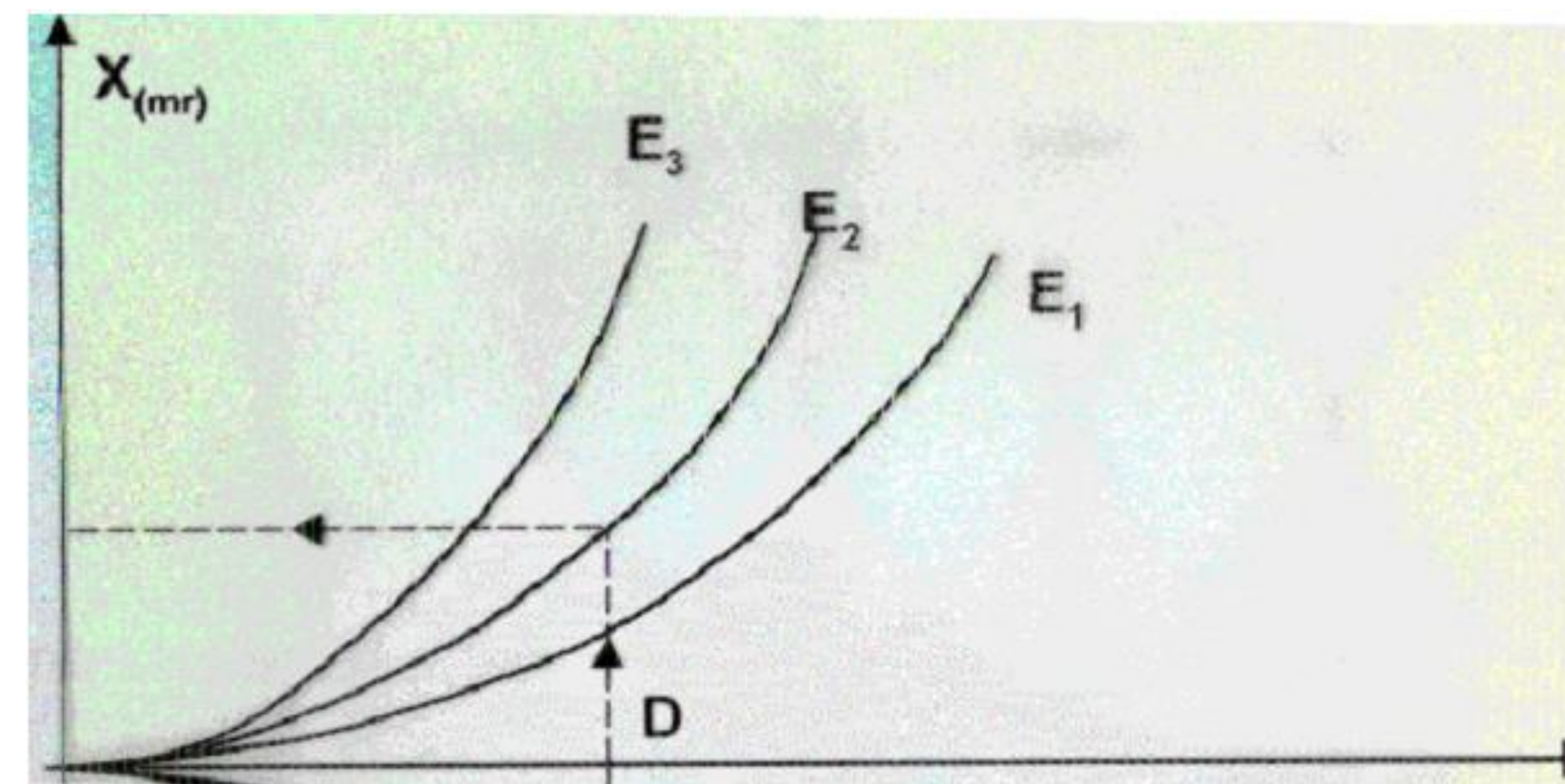


Fig.: Dependencia energética.

DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA



Ventajas

- Constancia de la lectura: luego de su correcto procesado la información de la densidad óptica está disponible cada vez que sea requerida.
- Disponibilidad en el mercado. Buen control de calidad.
- Geometría: su forma delgada y plana permite su uso simple en mapeos de campo.
- Linealidad vs dosis: la densidad estándar es proporcional a la dosis en un rango aceptable de trabajo. El límite máximo de uso está relacionado con la saturación y la reducción de la pendiente OD vs Dosis.
- Discriminación entre irradiaciones estáticas y en movimiento.
- Discriminación de energías mediante distintos filtros.



DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA



Desventajas

- Procesamiento químico: requiere un cuidadoso control del proceso de revelado para obtener una adecuada reproducibilidad de la densidad óptica para una dada dosis en la película. Variaciones en 1°C en el baño de revelado puede afectar la OD considerablemente.
- Dependencia energética para rayos X: el alto Z de los granos de BrAg da lugar a la manifestación del efecto fotoeléctrico para rayos X ($E < 300 \text{ keV}$). La respuesta por mGy en tejido es muy dependiente de $h\nu$.
- Sensibilidad al ambiente externo: el *fading* de los granos revelables es aumentado por combinaciones de temperatura y alta humedad. Se cree que el mecanismo principal del *fading* es la oxidación de la imagen latente por el oxígeno atmosférico, y su tasa se incrementa por el contenido alto de agua en la emulsión y bajo pH.
- Función de respuesta doblemente valuada: la OD a grandes dosis presenta un máximo y luego decrece, debido a la reversión del proceso de formación granos revelables (solarización). Para evitar esto se debe tener en claro cuáles son los niveles de dosis esperados.

DOSIMETRÍA FOTOGRÁFICA

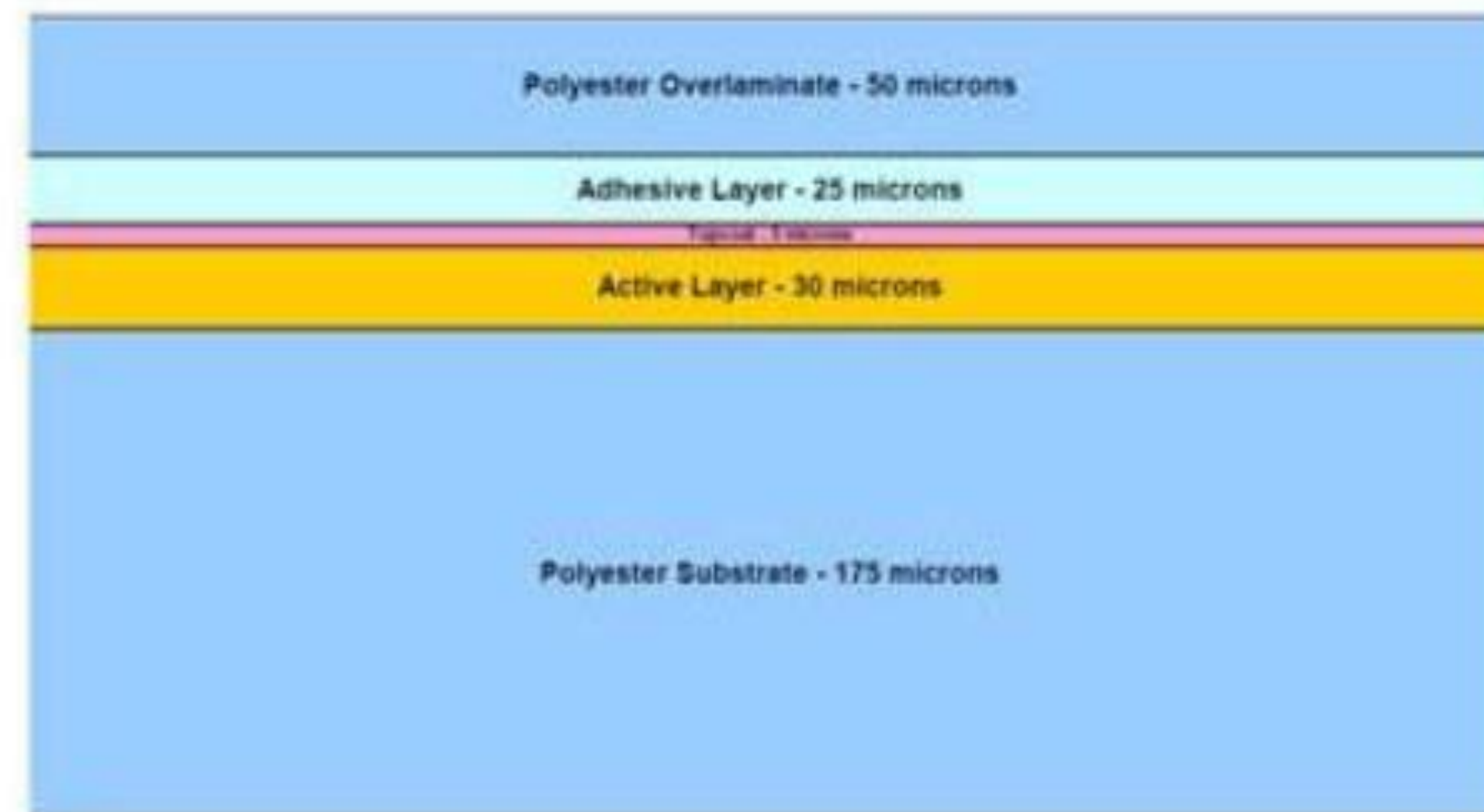
Dosímetro de film



DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



- Las películas radiocrómicas (PRC) contienen un principio activo de polímeros, principalmente C (40%), H (40%) y O (16%), en forma de agujas de 20 μm de longitud y 1,5 μm de diámetro, de forma que cuando se exponen a la radiación sufren una polimerización parcial y el color del polímero se vuelve más oscuro conforme aumenta la dosis absorbida. El proceso dosimétrico se completa cuando la película irradiada se analiza con un densitómetro de transmisión.



Película EBT2 (Gafchromic, ISP)

DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Algunas características de las PRC

- Rango de sensibilidad de dosis entre 1 cGy hasta 800 cGy.
- Revelado en tiempo real.
- Los cambios de densidad se estabilizan rápidamente después de la exposición.
- Respuesta en dosis independiente de la energía desde keV hasta MeV.
- Equivalente al tejido. $Z_{\text{eff}} = 6,98$ ($Z_{\text{eff agua}} = 7,3$)



DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Algunas características de las PRC

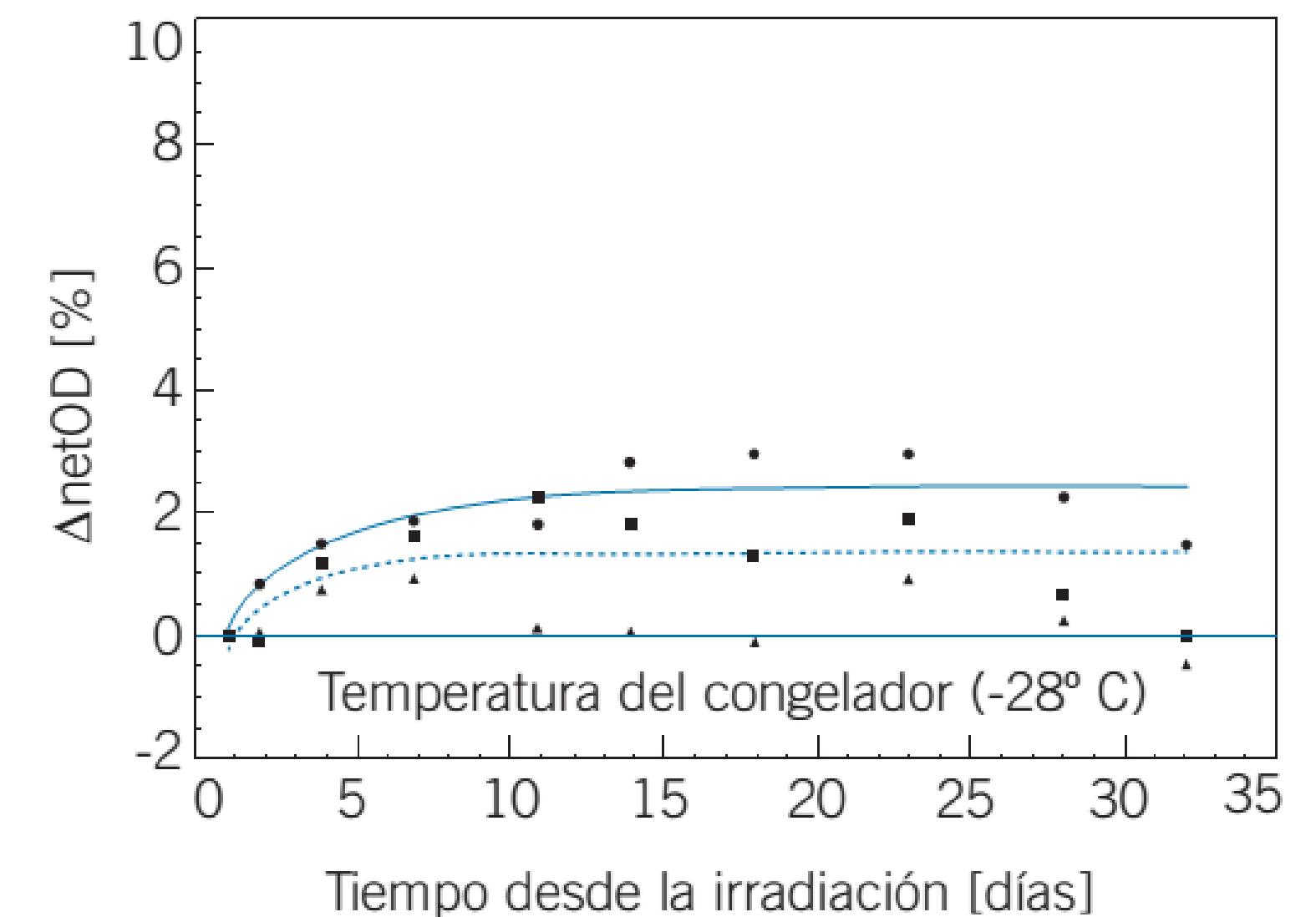
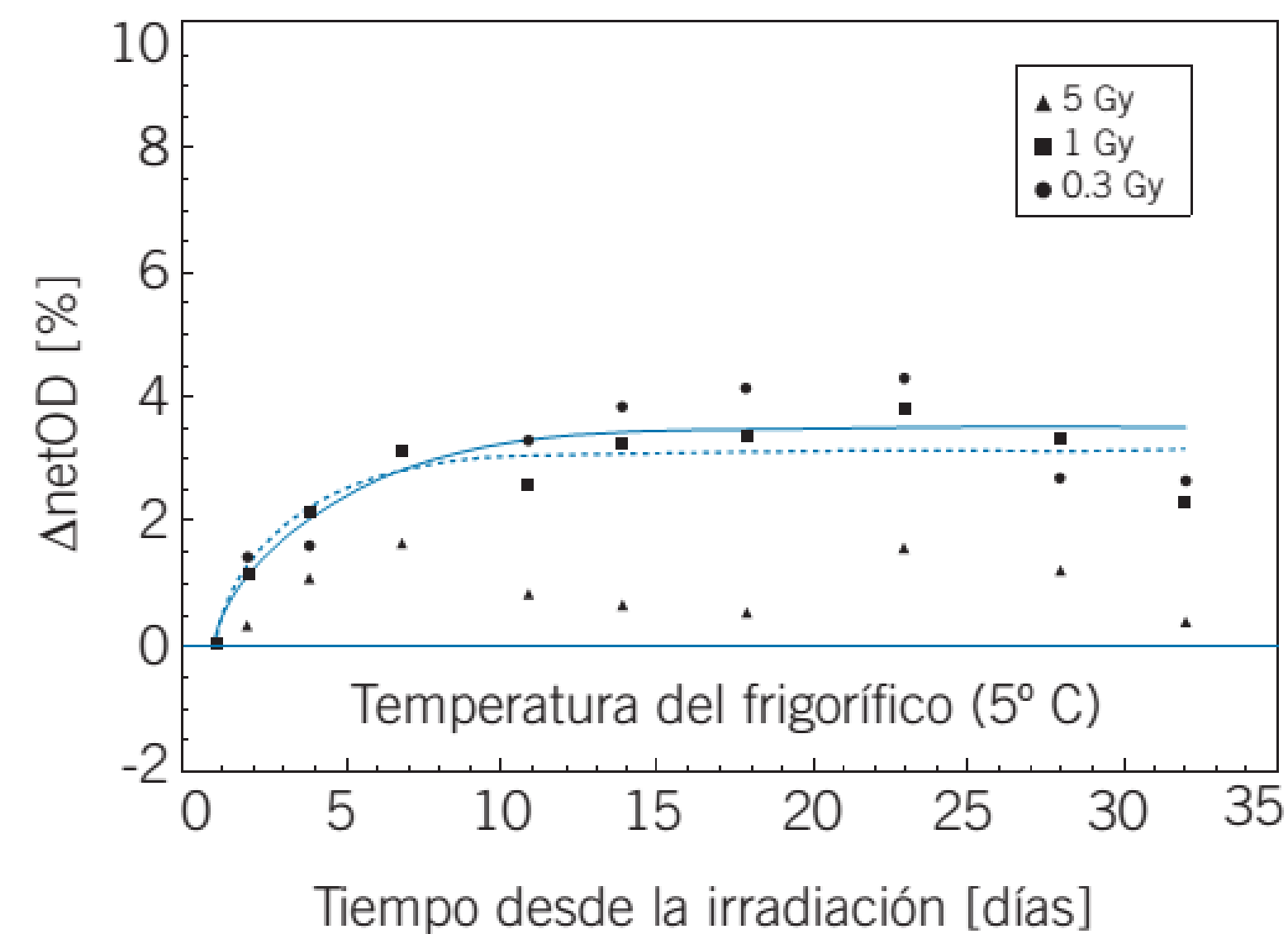
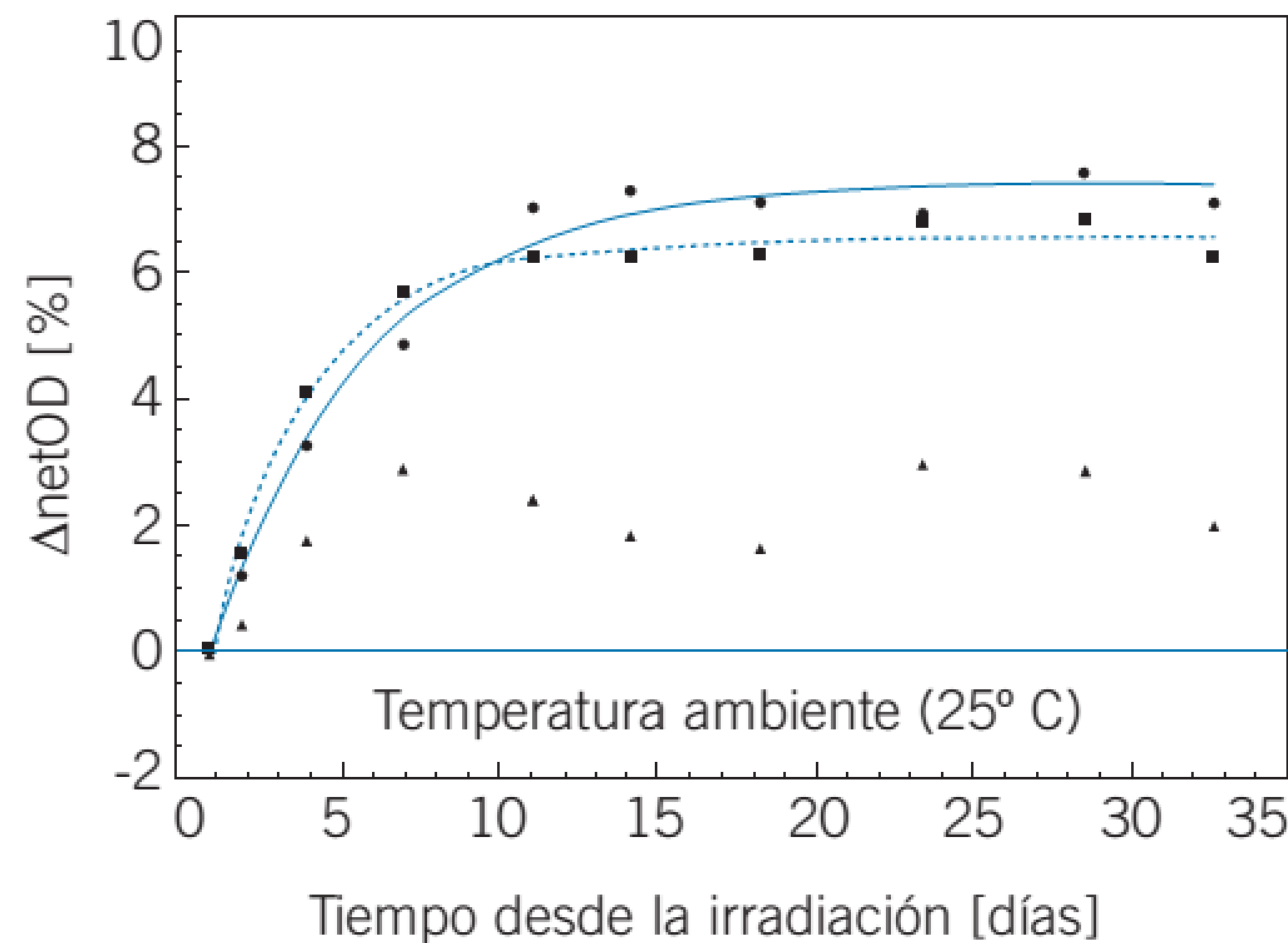
- Puede ser manejada a la luz.
- El resultado del escaneo depende fuertemente de la orientación de la película en el escáner.
- La coloración post-irradiación se produce principalmente en las 6 hs. posteriores. Entre 6 hs y 24 hs, la variación de ennegrecimiento es de un 1%.
- No sirven como medio de archivo permanente.



DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Tiempo desde la irradiación [días]



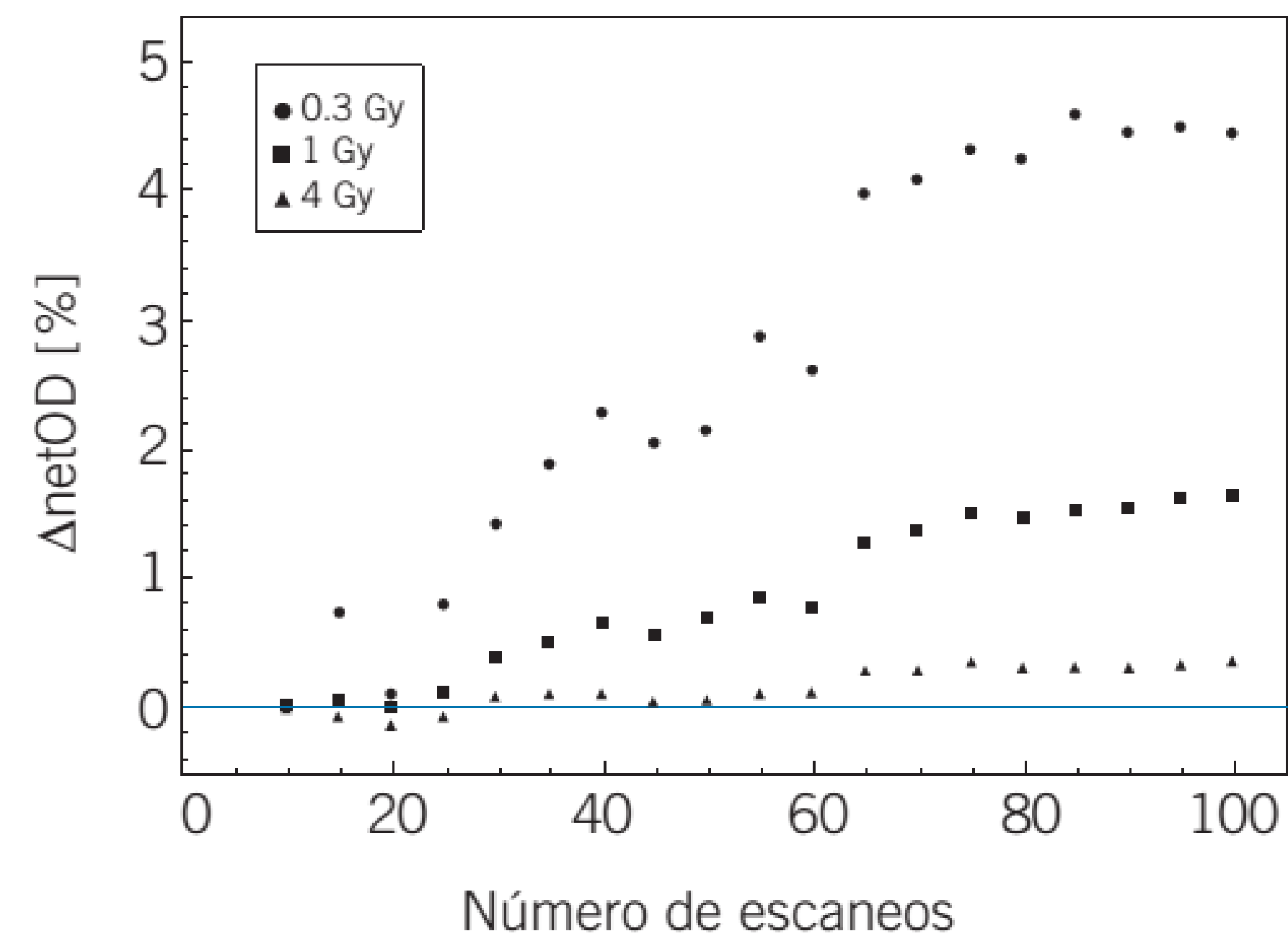
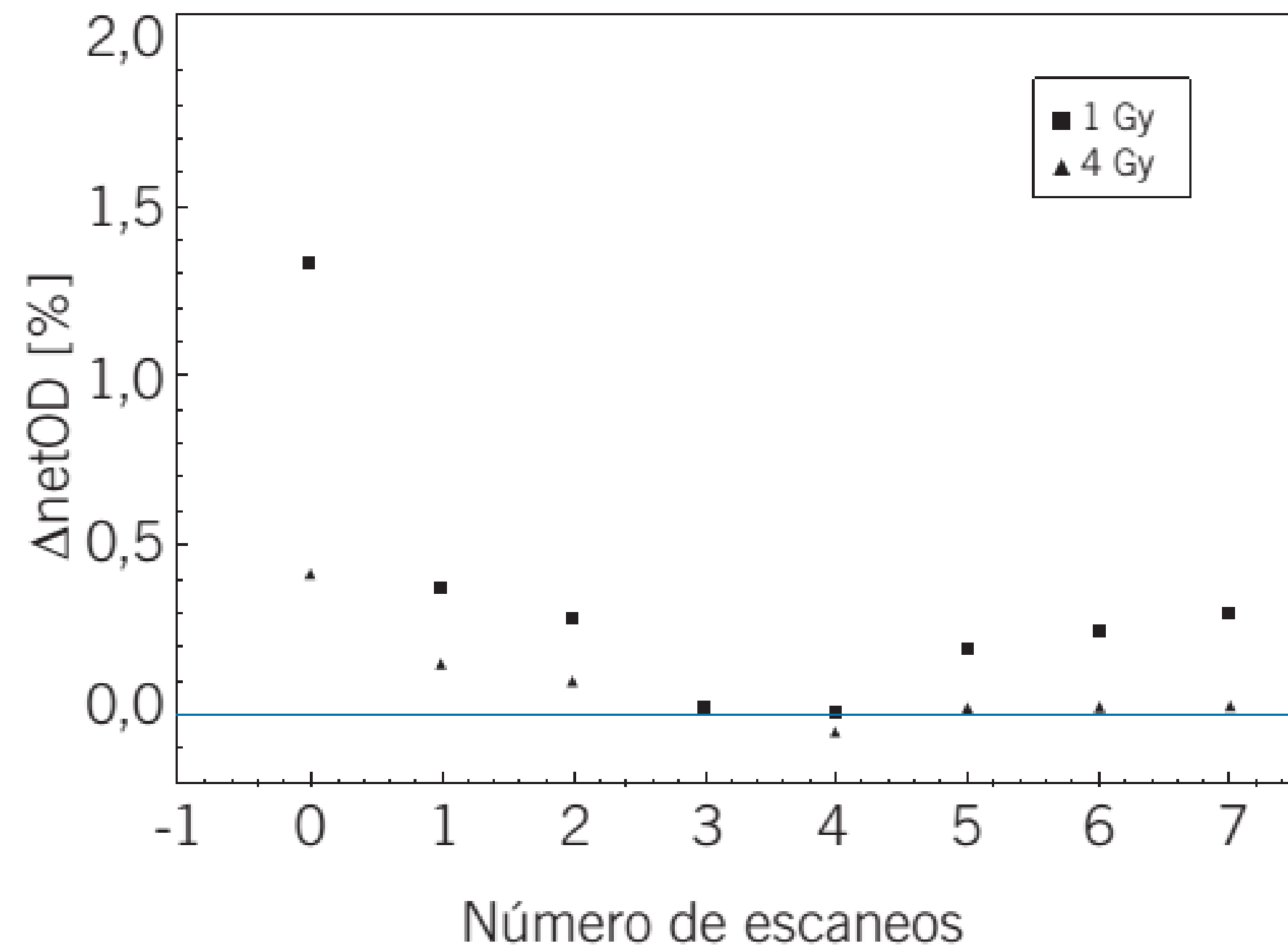
Cambio en la densidad óptica neta en función del tiempo transcurrido desde la irradiación, para tres niveles de dosis diferentes. Las películas fueron almacenadas: (a) a temperatura ambiente, (b) en una heladera, (c) en un freezer.
(Martisikova et al. 2008)

Una película no irradiada aumenta su densidad óptica un 0,8% en un mes. (Arráns et al. 2009)

DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Número de escaneos tras la irradiación



Cambio en la densidad óptica neta en función del número de escaneos realizados, para distintos niveles de dosis. (a) Primeros 7 escaneos normalizados al tercero, siendo el número cero la previsualización. (b) Desde el escaneo 10 hasta el 100, normalizado al décimo. (Martisikova et al. 2008)

DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Influencia de la dirección del escaneo

El origen de esta dependencia radica en la forma de fabricación de las películas y en los componentes activos de las mismas.

Los elementos activos tienen forma de aguja ($20\ \mu\text{m}$ de longitud y $1,5\ \mu\text{m}$ de diámetro aprox.) y están alineados paralelamente según una dirección determinada por la propia película (*coating direction*).

Durante el escaneo, la incidencia de los fotones luminosos de la fuente de luz sobre los componentes activos alineados en la película produce una dispersión luminosa anisótropa y cierta polarización de la luz que hace que la respuesta registrada por el array CCD del escáner sea función de la orientación relativa película-escáner.

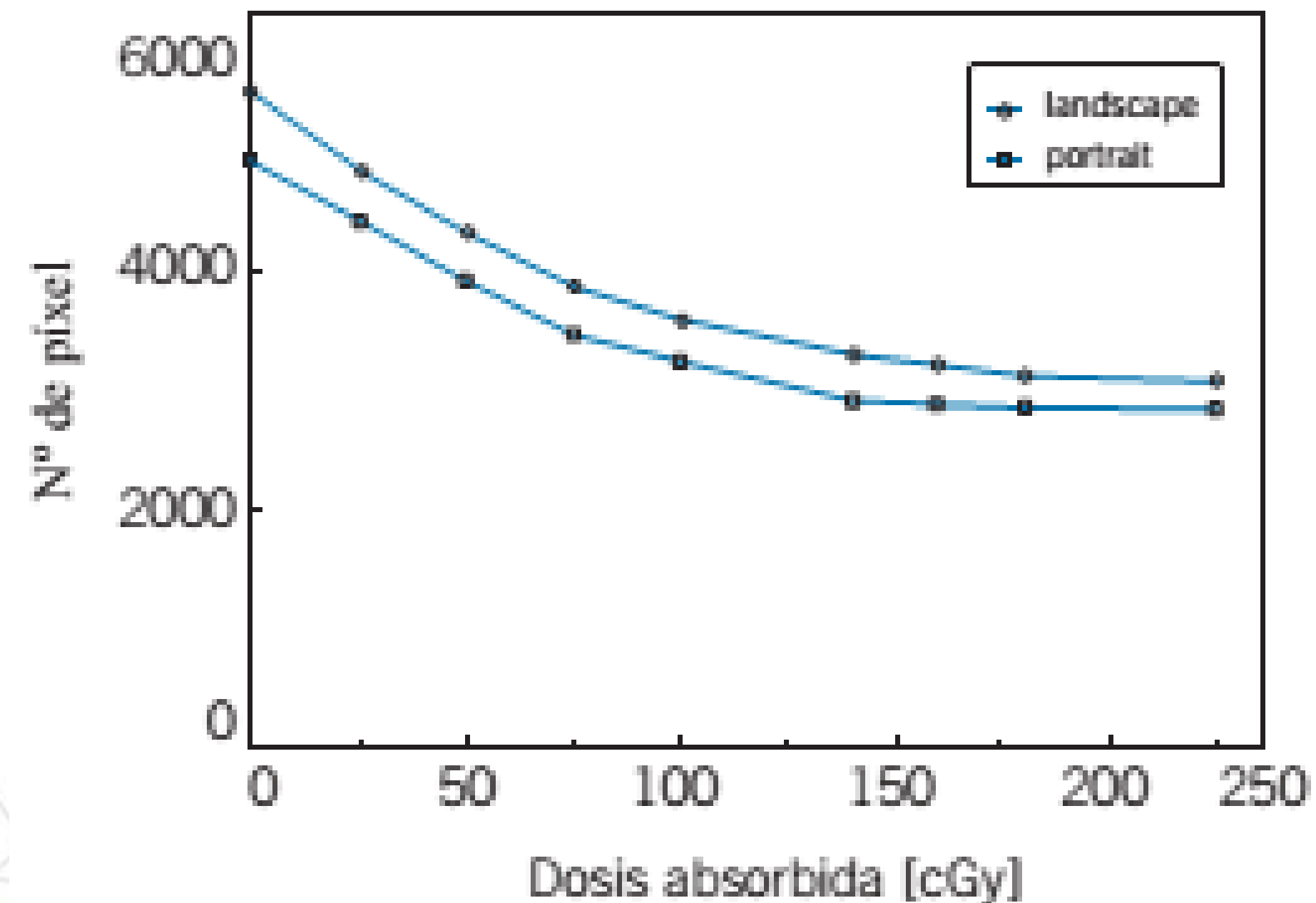
La dirección de escaneo debe ser perpendicular al array CCD del escáner.

Cuando la dirección de escaneo es perpendicular a la *coating direction* la orientación relativa se denomina *protrait*. Caso contrario, *landscape*.

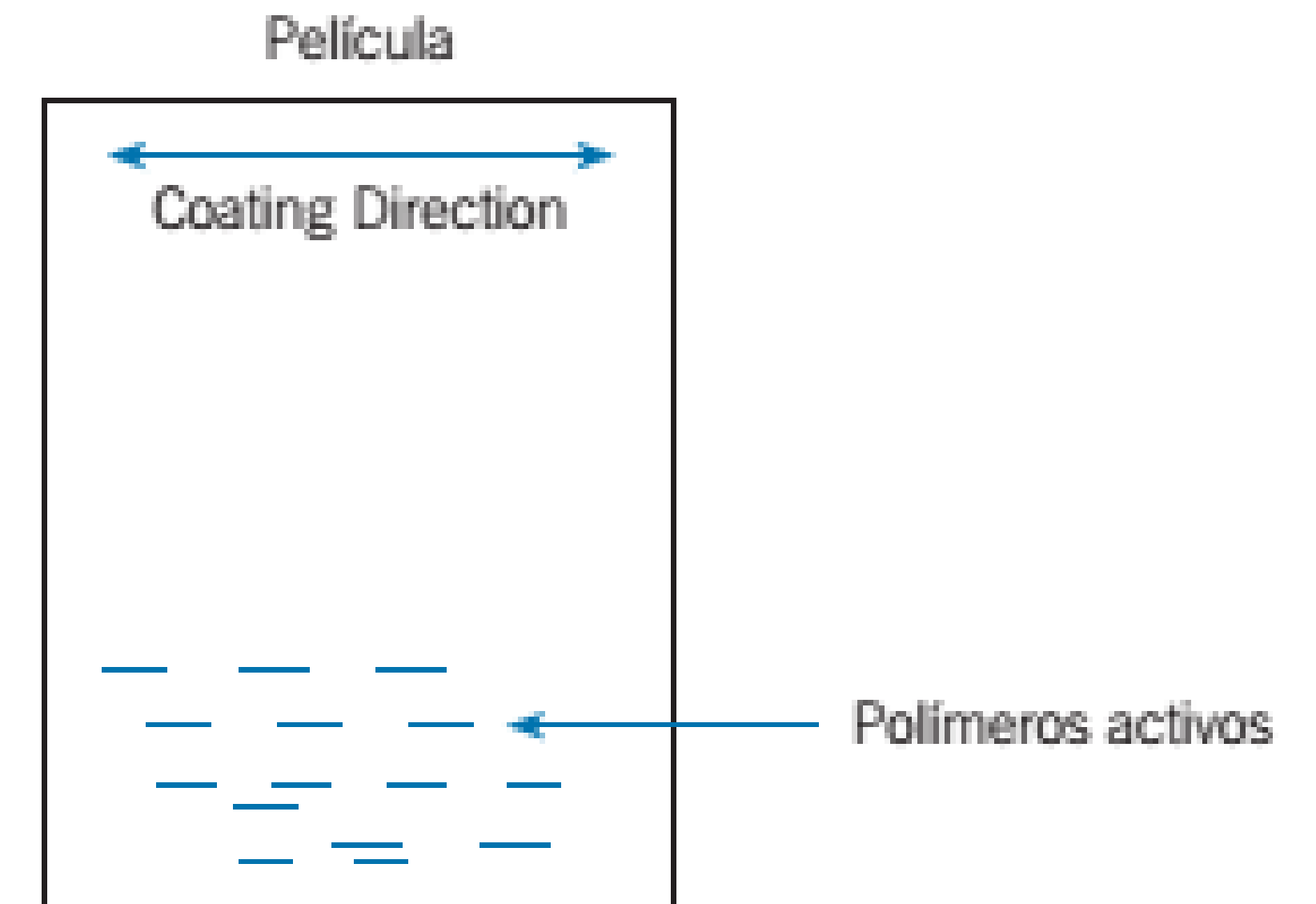
DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Influencia de la dirección del escaneo



Efecto de la orientación de escaneo en la respuesta de la película. En el eje Y se representa el valor de píxel cuando la adquisición se realiza con una profundidad de 16 bits por canal (McCullough y Holmes)



Representación esquemática de la disposición relativa de los elementos activos en una película radiocrómica.

DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Calibración

- Procedimiento AAPM-TG55: colocar las PRC en el centro de un campo de radiación amplio, perpendicular al haz y a la profundidad de interés (> 5 cm).
- Amplio rango de dosis.
- El tamaño de campo usado no influye en la curva de calibración. (Especialmente útil en tratamientos de IMRT).
- 12 es el número mínimo de puntos para la calibración para reducir la incertidumbre. 35 es el número óptimo.
- Función ajuste del tipo

$$D_{fit} = aDO_{neta} + bDO_{neta}^n$$

donde **a** y **b** son parámetros de ajuste y **n** es el valor que minimiza la incertidumbre total (**n** ~2,5)
(Arráns et al. 2009)

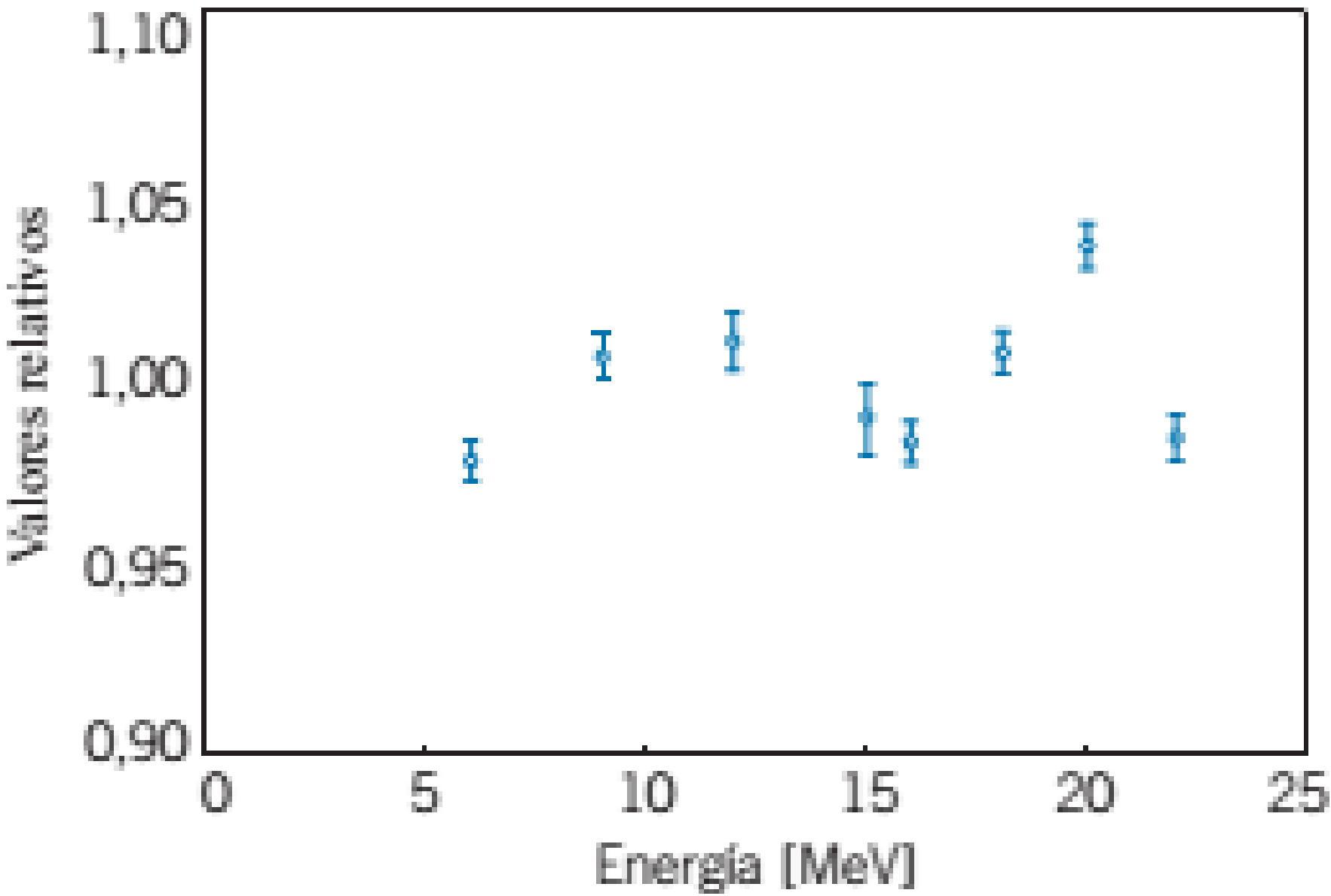
DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Dependencia energética

Respuesta de la película EBT para 2 Gy a diferentes energías (Butson et al. 2005)

Energía (kVp)	Respuesta relativa ($\pm 0,037$ SD)
50	0,923
75	0,926
100	0,930
125	0,929
150	0,928
200	0,946
250	0,956
6000	1,000
18000	0,996

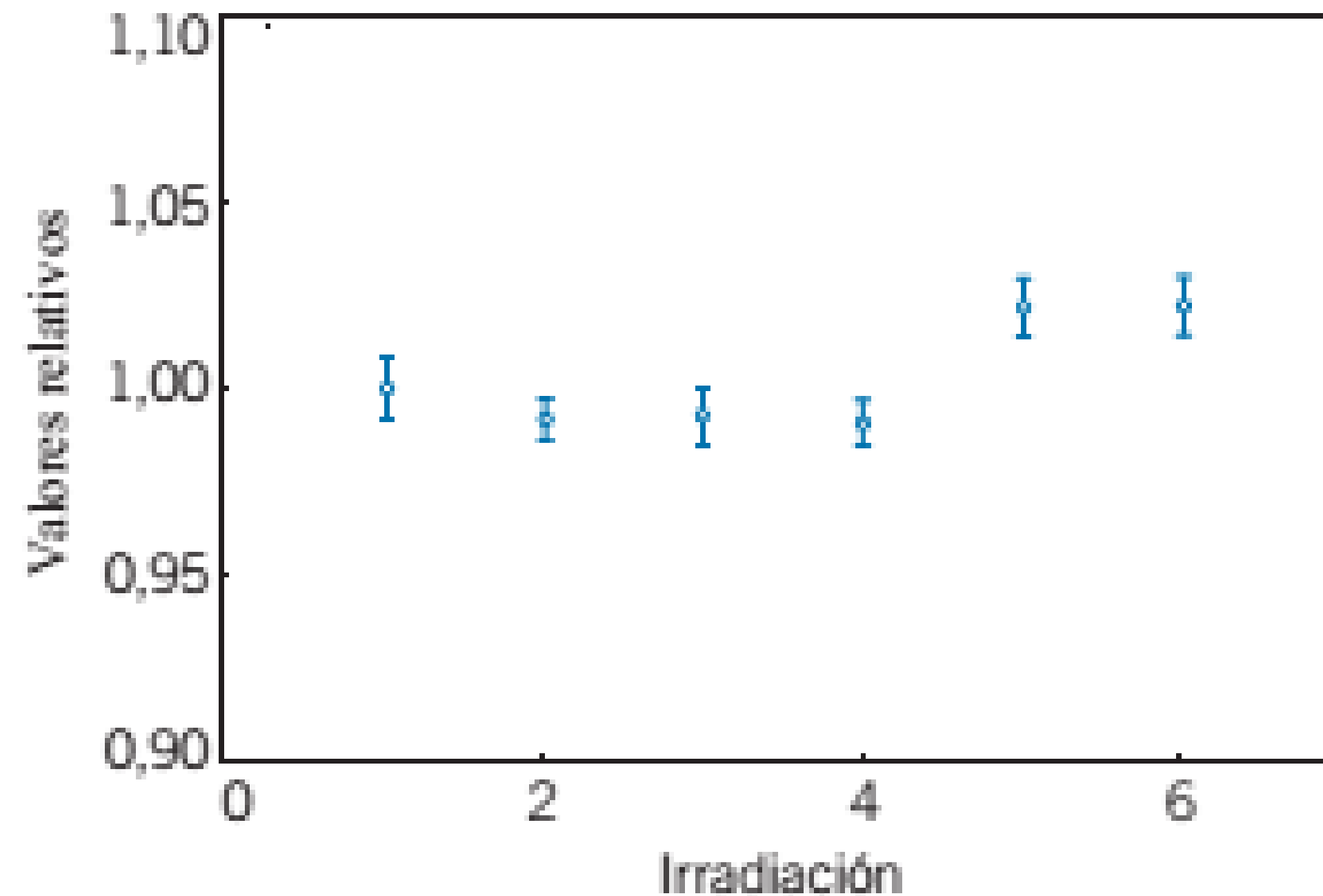


Dependencia energética de las películas EBT para haces de electrones. (Su et al. 2007)

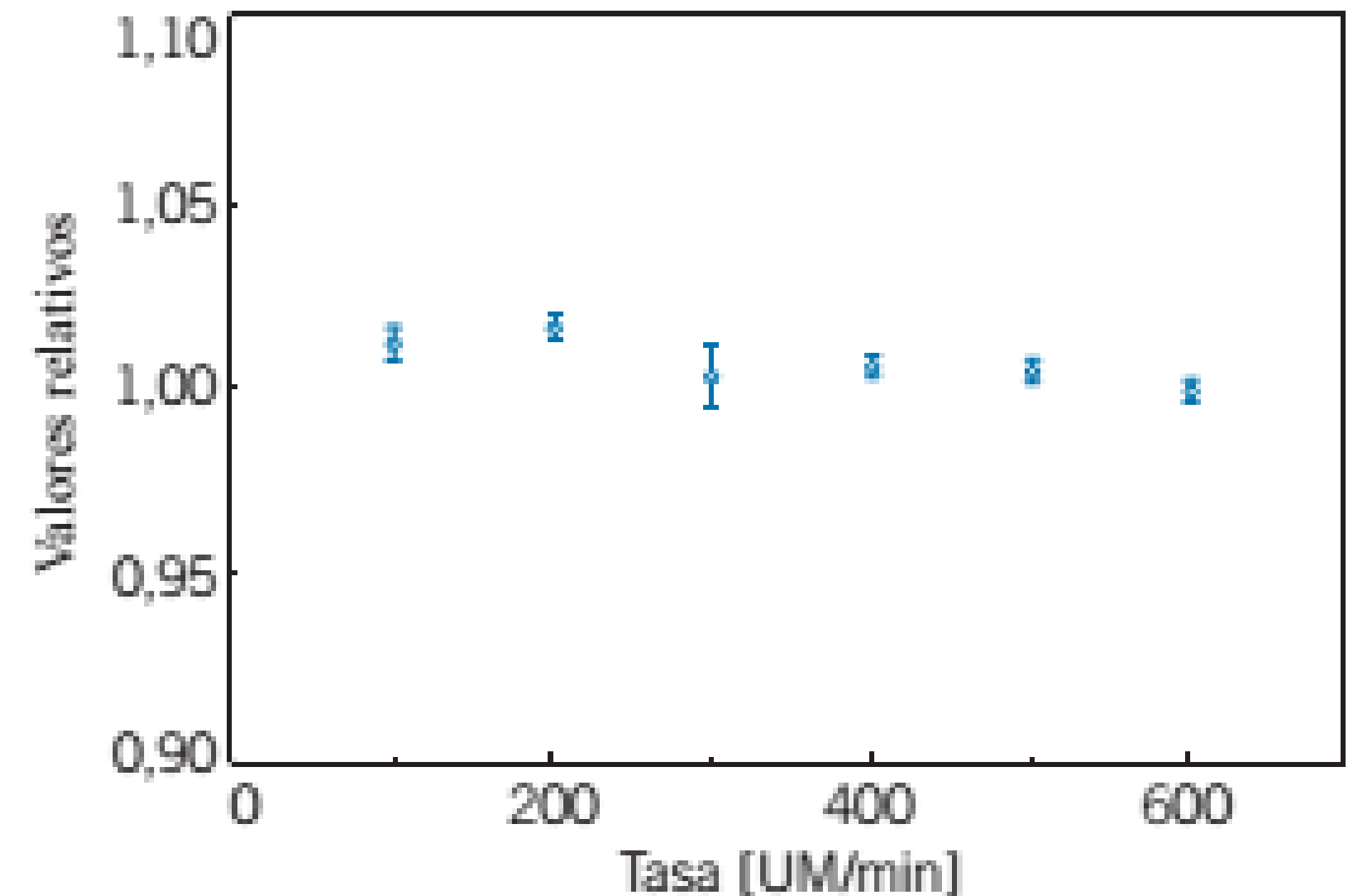
DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS



Dependencia con el fraccionamiento y la tasa de dosis



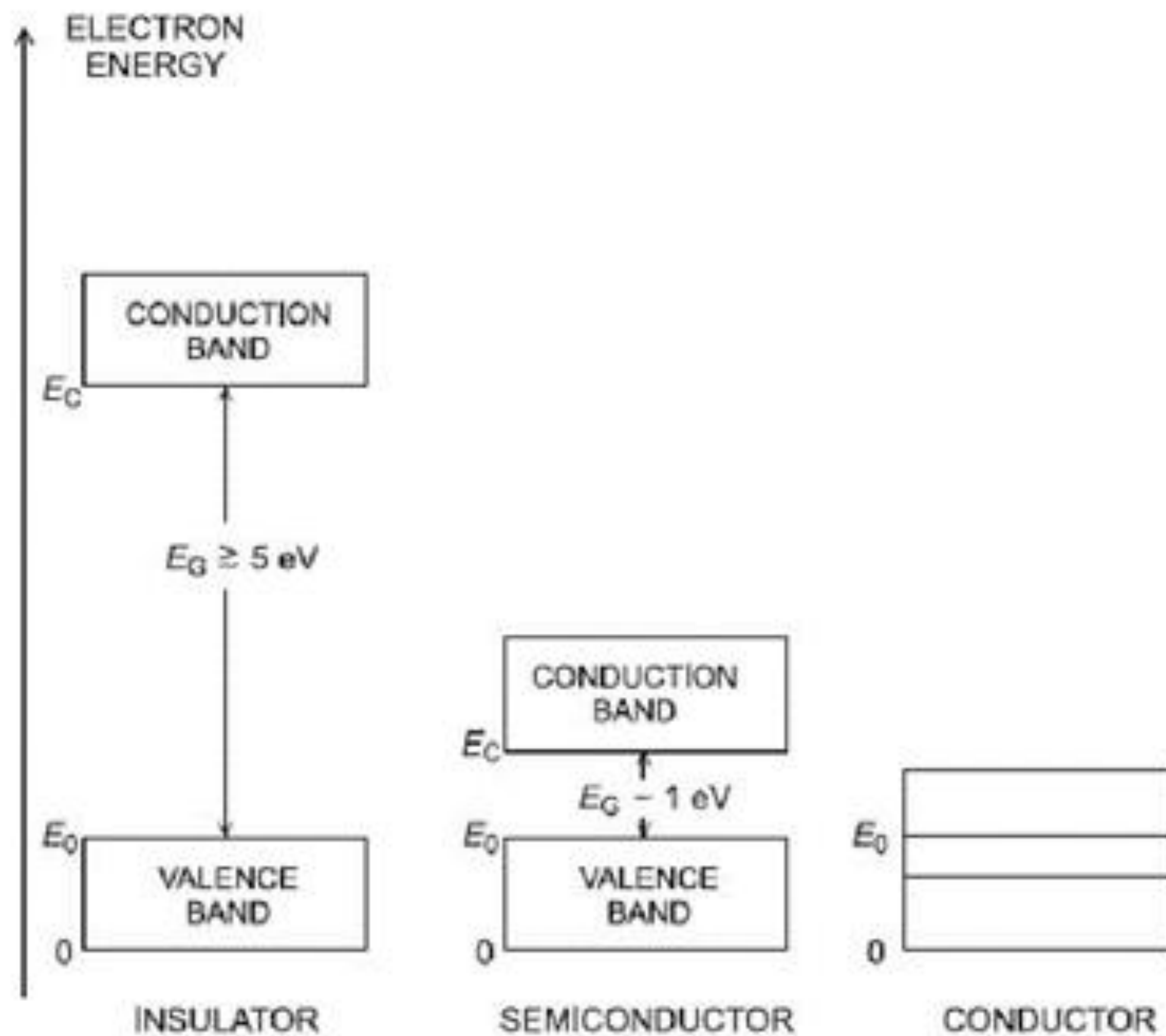
Dependencia de la respuesta de las películas EBT con la dosis por fracción para haces de electrones. (1) Una única irradiación de 200 UM. (2) Dos exposiciones de 100 UM. (3) Cuatro exposiciones de 50 UM. (4) Ocho exposiciones de 25 UM. (5) 20 exposiciones de 10 UM. (6) Cinco exposiciones de 40 UM. (Su et al. 2007)



Influencia de la tasa de dosis en la respuesta de las películas EBT. (Su et al. 2007)

DOSIMETRÍA DE ESTADO SÓLIDO

Teoría de bandas



DOSIMETRÍA DE ESTADO SÓLIDO



Conductores, semiconductores y aisladores

- Un **conductor** es todo cristal en el cual la banda de valencia (*bv*) y la banda de conducción (*bc*) se superponen parcialmente, por lo que los electrones que originalmente estaban en la *bv* pasan muy fácilmente a la *bc* con muy pequeña energía de activación. En consecuencia, a temperatura ambiente son muchos los electrones que están en la *bc*, que a su vez se encuentra parcialmente llena, y así el cristal conduce muy fácilmente la corriente eléctrica.
- Los **semiconductores** son cristales en los cuales la energía de activación es aprox. 1 eV.
- Los **aisladores** son cristales en los cuales la energía de activación es aprox. 6 eV.



DETECTORES SEMICONDUCTORES



Ventajas

- La alta densidad del medio ionizado; esto implica una considerable eficiencia de detección por unidad de volumen efectivo del detector.
- La energía necesaria para producir un par de portadores de carga en los semiconductores es aprox. 10 veces menor que en los gases y 100 veces menor que en un centellador. Por lo tanto, para una misma energía impartida, la cantidad de portadores de carga producidos es mucho mayor en los semiconductores que en gases o centelladores, lo cual se traduce en menores fluctuaciones estadísticas, por lo que se tiene una mejor resolución.
- La movilidad de los electrones y huecos es elevada y por otra parte, es reducido el volumen efectivo del medio detector; ello se traduce en un tiempo de recolección de cargas muy breve (~ 1 nseg). En consecuencia es elevada la resolución en tiempo.
- Pueden obtenerse fácilmente detectores muy delgados de manera que absorban una fracción de la energía de las partículas incidentes, a fin de medir su ionización específica (dE/dx)

DETECTORES SEMICONDUCTORES



Desventajas

- Su alta conductividad en comparación con la de los gases, lo cual se traduce en ruido que tiende a enmascarar la medición de partículas ionizantes de muy baja energía.
- Los defectos en su estructura cristalina (es decir, las vacancias y dislocaciones) producen recombinación de los portadores y, por lo tanto, pérdida de algunos de ellos, lo que resta eficiencia de detección.

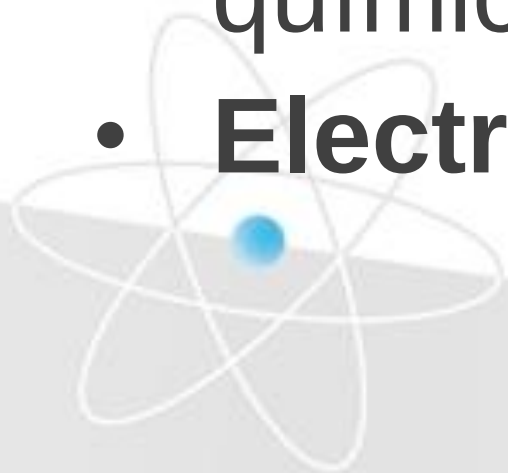


DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE (TLD)



Luminiscencia

- Es el proceso de emisión de radiación óptica de un material por causas no térmicas, que presentan algunas sustancias dieléctricas o semiconductoras en determinadas condiciones de excitación. Los medios de excitación, en el fenómeno general de la luminiscencia son por ejemplo:
 - **Fotoluminiscencia** producida por la interacción de fotones ópticos.
 - **Triboluminiscencia** originada por movimientos mecánicos.
 - **Quimioluminiscencia** debida a la entrega a la red de energía que surge de las reacciones químicas.
 - **Electroluminiscencia** originada por la energía transmitida por un campo eléctrico.



DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE (TLD)



Termoluminiscencia

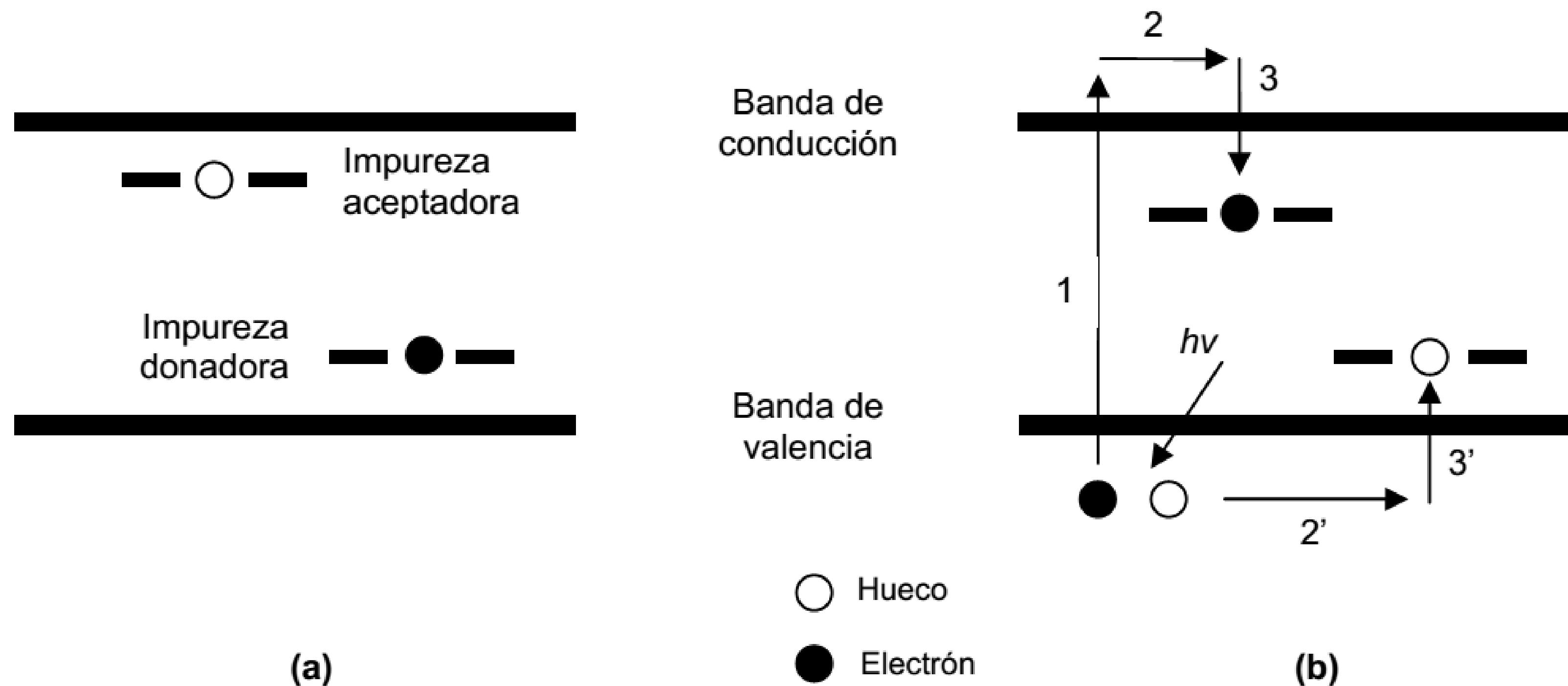


Figura 1.1. Diagrama de bandas de un cristal termoluminiscente sin sensibilizar (a), y durante el proceso de sensibilización (b).

DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE (TLD)



Termoluminiscencia

- El proceso de sensibilización de un cristal termoluminiscente se basa en la creación de pares electrón-hueco.
- Al incidir la radiación ionizante sobre un cristal termoluminiscente, se excitan los electrones de la banda de valencia y promocionan a la banda de conducción (1) (Fig. 1.1.b)
- El electrón se mueve libremente por la banda de conducción (2), hasta que es atrapado en las trampas (3) creadas por las impurezas aceptadoras.
- Al mismo tiempo, el hueco se va desplazando por la banda de valencia (2'), hasta que un electrón de las impurezas donadoras pierde parte de su energía y se recombina con él (3').
- Al final del proceso, los electrones desplazados por la radiación quedan atrapados en las impurezas aceptadoras próximas a la banda de conducción, y los huecos, en las impurezas donadoras en las proximidades de la banda de valencia.
- A temperatura ambiente pueden permanecer en este estado durante largos períodos de tiempo sin que se presente de forma apreciable la vuelta a estados no excitados o recombinación de electrones y huecos.

DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE (TLD)



Termoluminiscencia

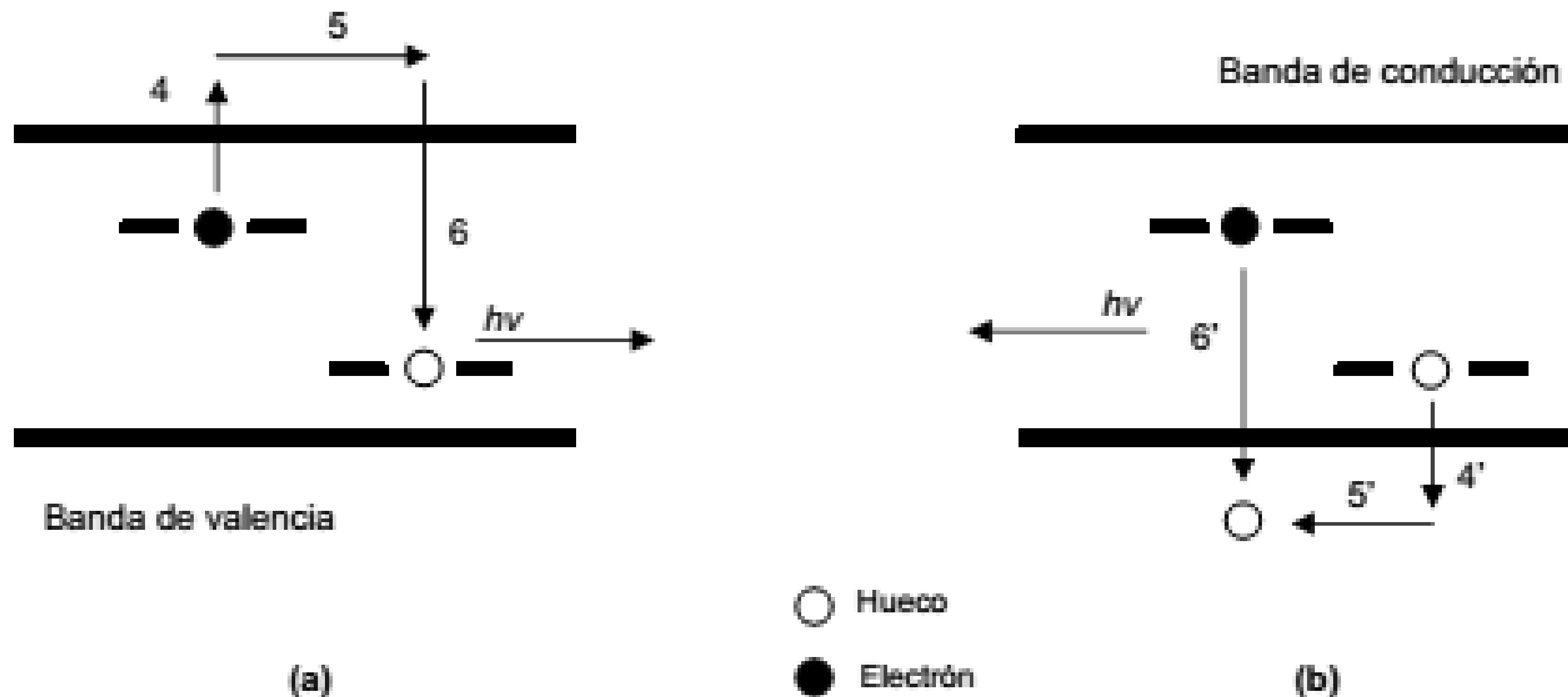


Figura 1.2. Proceso de termoluminiscencia:
(a) por liberación del electrón, (b) por liberación del hueco.



DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE (TLD)



Termoluminiscencia

- Se puede medir la energía absorbida por el cristal invirtiendo el proceso de sensibilización. Elevando la temperatura, se incrementa la excitación térmica de los portadores atrapados en los estados de la banda prohibida, pudiendo escapar de dichos estados y recombinarse. Este proceso de recombinación de los pares se puede realizar mediante dos vías:
 - Mediante liberación de electrones, que se caracteriza por tener un estado intermedio en el que un electrón se desplaza por la banda de conducción (Fig. 1.2.a).
 - Por liberación de huecos, proceso en el cual se produce un estado intermedio en el que una vacante se mueve por la banda de valencia (Fig. 1.2.b).



DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE (TLD)



Termoluminiscencia

- En un cristal TL, la diferencia de energía necesaria para activar un método de recombinación u otro será diferente, por lo que durante el calentamiento, predominará a temperaturas más bajas aquel proceso que necesite proporcionar a los electrones una menor energía.
- Tanto si la recombinación se debe a la liberación de huecos, como a la liberación de electrones, se produce una recombinación de pares en la que la diferencia de energía del estado inicial y el final es del orden de 1 eV a 3 eV, por lo que el fotón emitido se encuentra dentro del espectro visible.
- Estos fotones emitidos en el espectro visible, son amplificados mediante un fotomultiplicador y registrados durante un tiempo determinado.



TERMOLUMINISCENCIA



Curva glow

- En el proceso de emisión se alcanzan uno o varios máximos de emisión luminosa, hasta alcanzar el punto en el que prácticamente la totalidad de los electrones, que en un principio se encontraban atrapados en los estados intermedios se han recombinado, cesando la emisión.
- La representación de la intensidad luminosa frente a la temperatura de calentamiento se conoce como curva de emisión, curva de brillo o curva *glow*, y presenta una serie de máximos a unas temperaturas determinadas característicos de cada material termoluminiscente. (Fig. 1.3)



TERMOLUMINISCENCIA



Curva glow

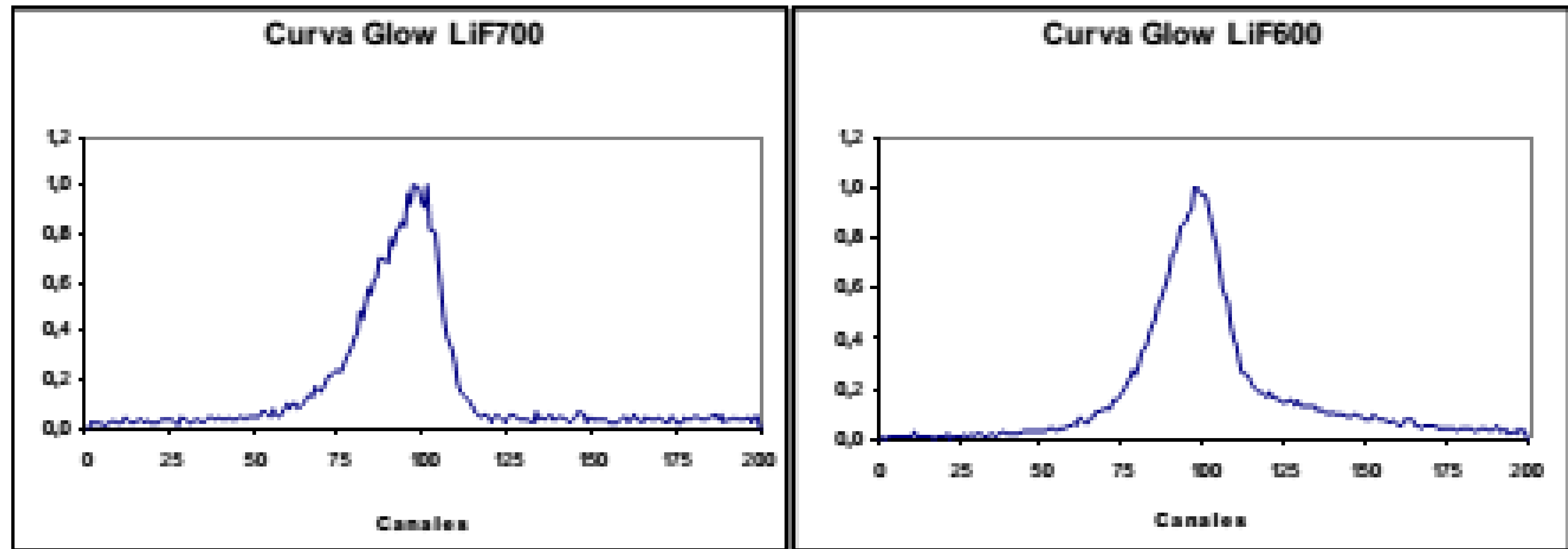


Figura 1.3. Curva glow de LiF700 y LiF600.

DETECTORES TERMOLUMINISCENTES

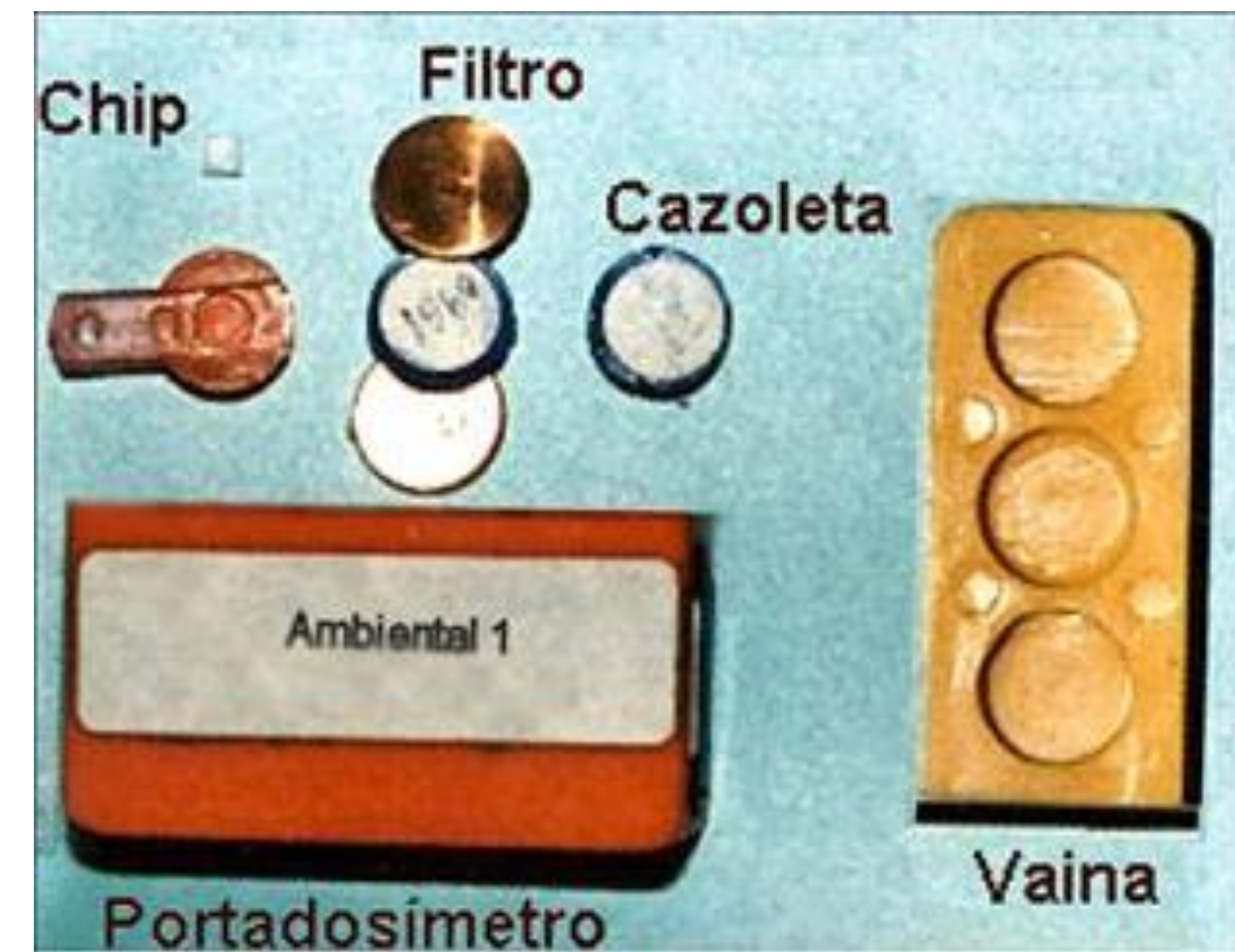


- Los detectores termoluminiscentes (TLD) son detectores pasivos e integradores que permiten realizar la determinación de dosis y discriminar las componentes de distintos campos de radiación. El fundamento de su uso está basado en el fenómeno de luminiscencia.
- Los dosímetros más utilizados son LiF y CaF₂.



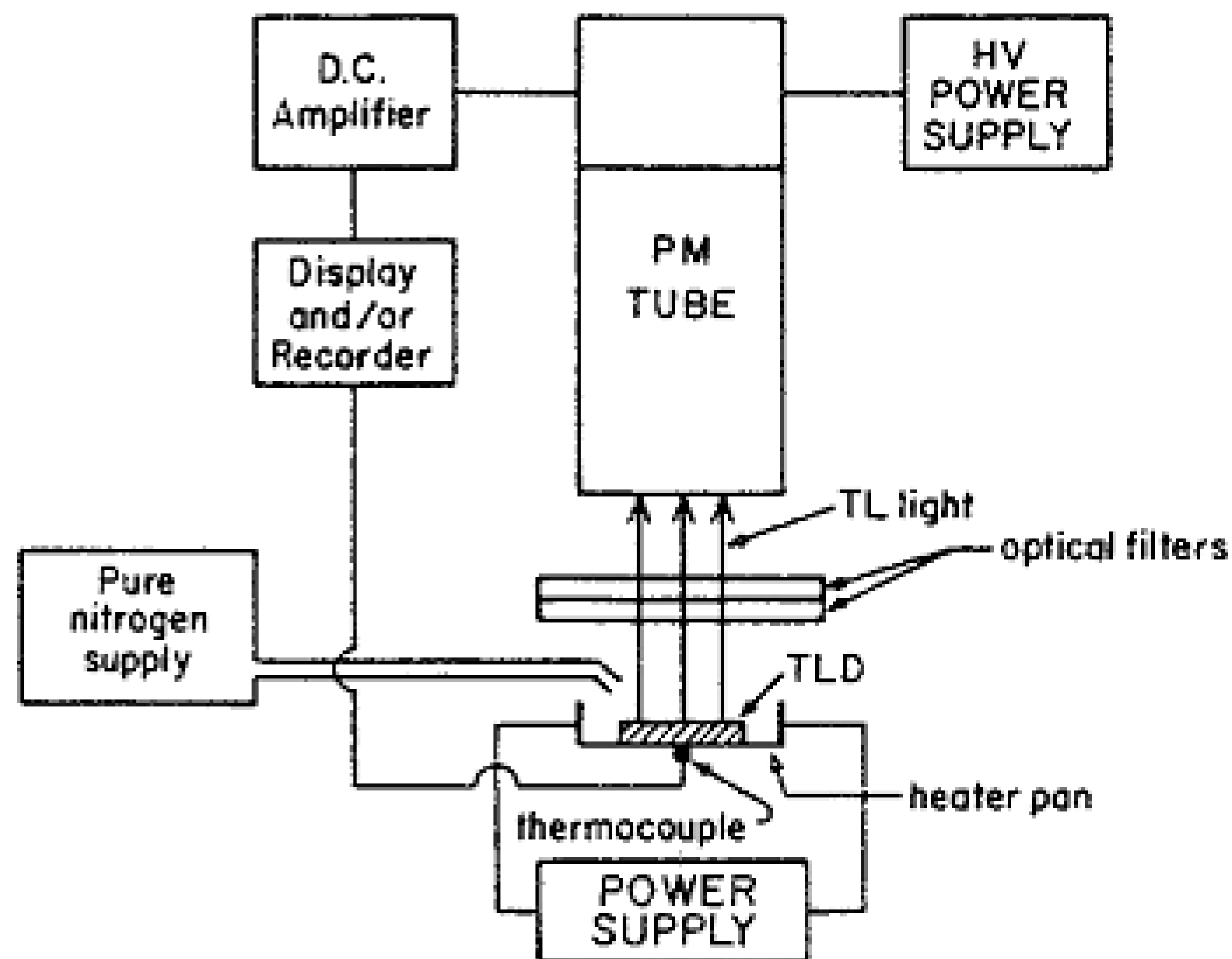
• **Figura 1.4.** Dosímetro TLD.

DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



DETECTORES TERMOLUMINISCENTES

El equipo de lectura



DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



Ventajas

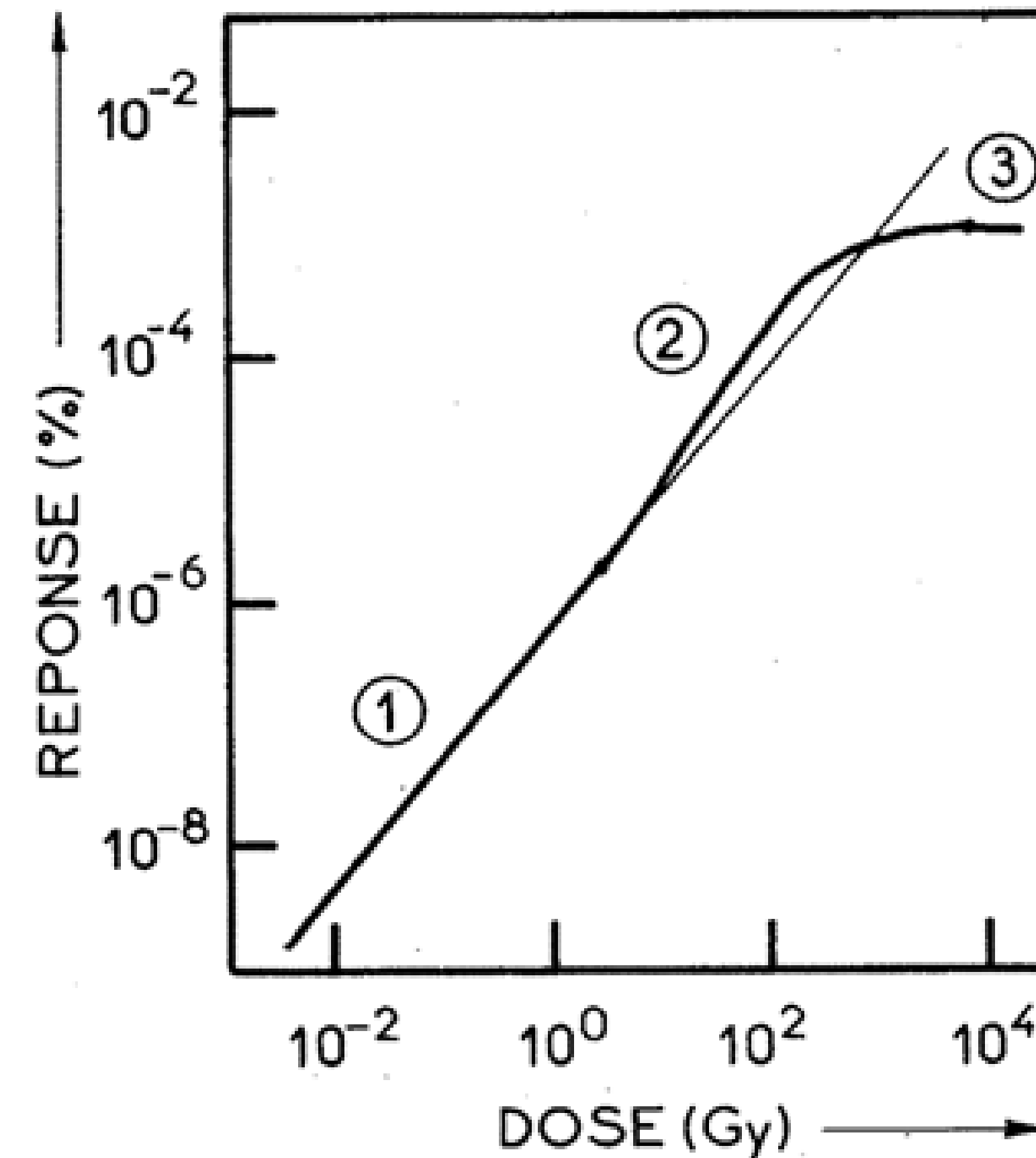
- Son de pequeñas dimensiones ($3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$) y bajo peso (10 mg aprox.) por lo que pueden ser utilizados en espacios muy reducidos.
- Son utilizables en un amplio rango de dosis (μGy – kGy)
- El número atómico ($Z \sim 8,3$) es similar al del tejido equivalente ($Z \sim 7,3$).
- La persistencia de la señal termoluminiscente por largos períodos permite la medición en el momento conveniente, luego de la irradiación.
- La eficiencia TL es independiente de la tasa de dosis. La eficiencia TL es el cociente entre la energía emitida como luz TL y la energía media impartida al material TL por el campo de radiación.
- La eficiencia TL es independiente de la temperatura de irradiación (en condiciones normales de trabajo).
- Son prácticamente insensibles a los agentes ambientales.
- Son dosímetros portátiles.
- Pueden ser reutilizados decenas o cientos de veces sólo con pequeños cambios en su eficiencia.

DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



Ventajas

- Gran **sensibilidad** de detección para diferentes tipos de radiaciones (X, γ , n).
- **Linealidad de la respuesta en función de la dosis:** la Figura 1.5 muestra la curva de respuesta de un LiF en función de la dosis absorbida. En general, se distinguen tres zonas: una zona lineal (1), una zona supralineal (2), una zona de saturación (3). De manera general se utiliza la zona lineal donde la respuesta es directamente proporcional a la dosis absorbida.



• **Figura 1.5.** Curva de respuesta de un LiF en función de la dosis absorbida.

DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



Desventajas

- No es un dosímetro absoluto, necesita su calibración en un campo de referencia patrón, con el consiguiente incremento del error.
- Efectos de superficie. Varios mecanismos dependientes de la superficie pueden afectar la sensibilidad TL. Los más importantes son los cambios en la transmisión luminosa debido a contaminación, y a la absorción gaseosa que puede también alterar la eficiencia intrínseca o dar lugar a señales no inducidas por radiación.
- Inhomogeneidad del lote o *batch*. La eficiencia TL así como su respuesta dependen en gran medida en la distribución espacial de la concentración de trampas. Como los defectos son dependientes de las impurezas en un nivel de ppm así como, en menor medida, de su historia radiante y térmica, es muy difícil fijar las propiedades de un material TL. Para obtener una óptima precisión se deben realizar calibraciones individuales de cada dosímetro.
- Los dosímetros irradiados no mantienen permanentemente toda la información entregada, dando como resultado una pérdida gradual de señal latente TL (*fading*).
- Pérdida de la información. El método de obtención de la información es destructivo.

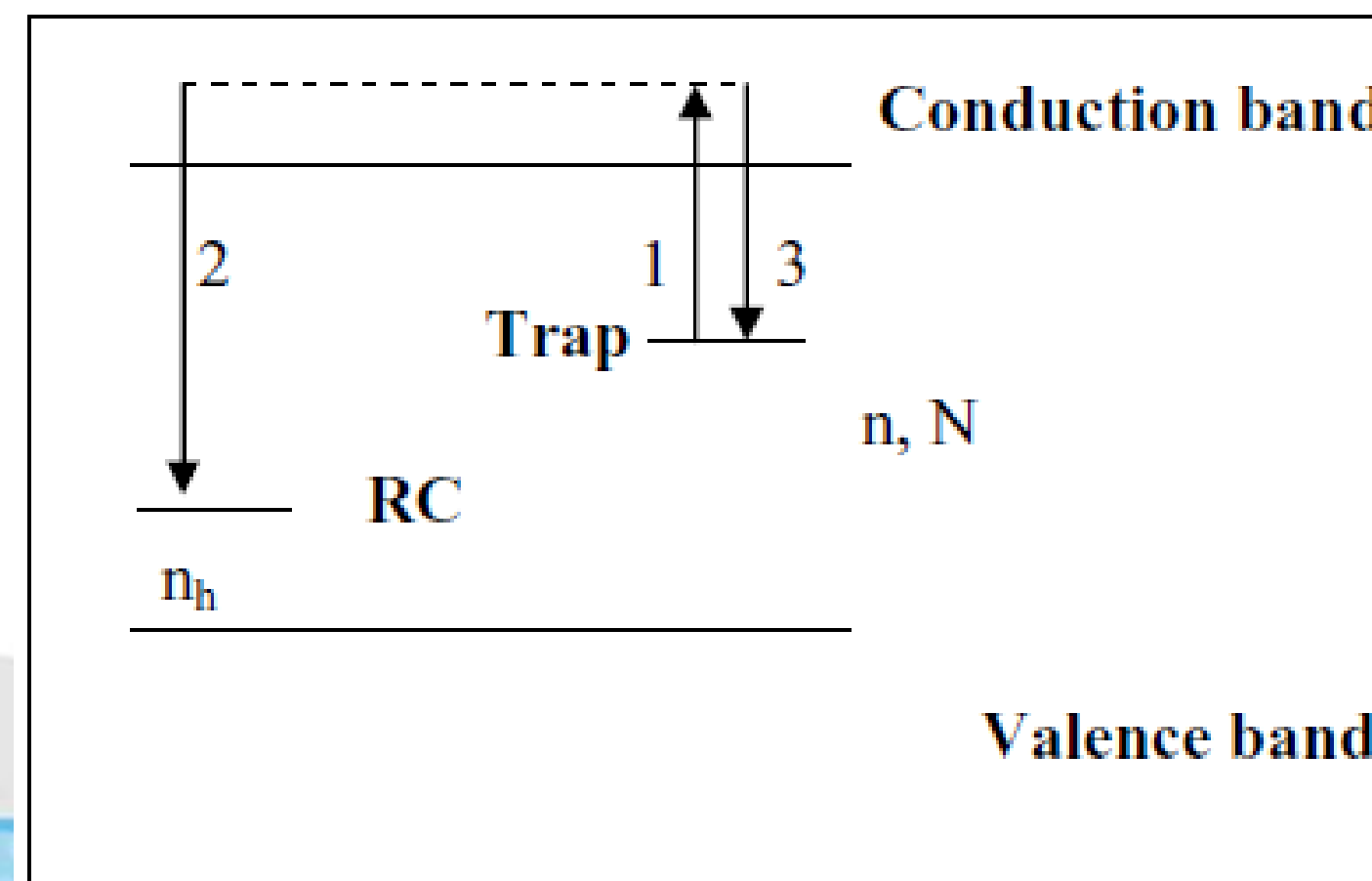
DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



La curva *glow*

•El principal objetivo de medir y analizar la curva glow es determinar los parámetros que describen el proceso termoluminiscente:

- E***: energía de activación (o profundidad de la trampa).
- s***: factor de frecuencia.
- b***: orden de cinética



$$I(t) = -\frac{dn_h}{dt}$$



DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



La curva glow

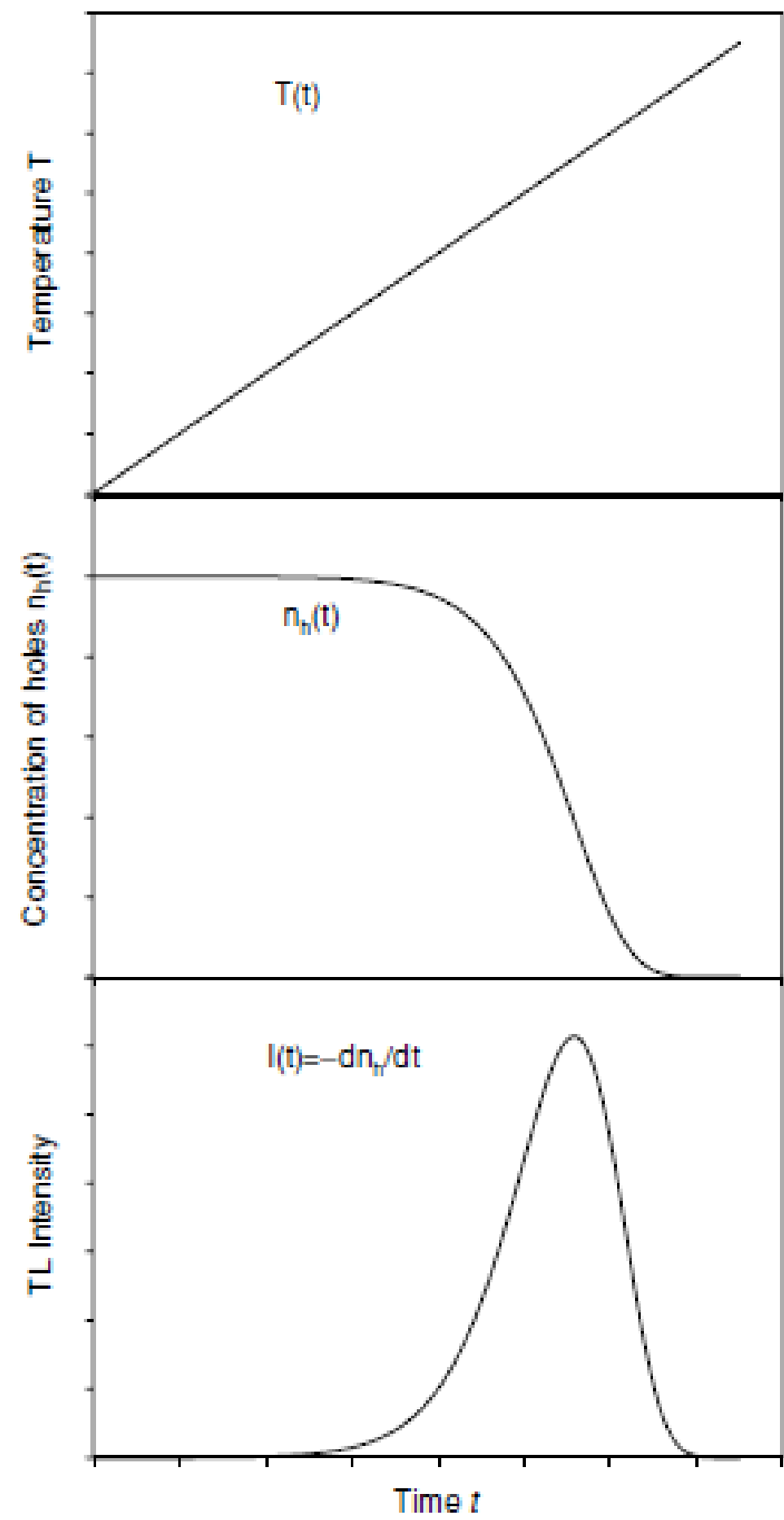


Diagrama esquemático del aumento lineal de la temperatura en la muestra T , la emisión de luz $I(t)$, y la correspondiente disminución de la concentración n_h de huecos atrapados.

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = nse^{-E/kT}$$

Ecuación que gobierna el proceso TL dada por Randall-Wilkins

Expresión de $I(t)$ que se obtiene al integrar la ecuación anterior, suponiendo una tasa lineal de calentamiento β .

$$I(t) = n_o \cdot s \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \cdot \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_o}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]$$

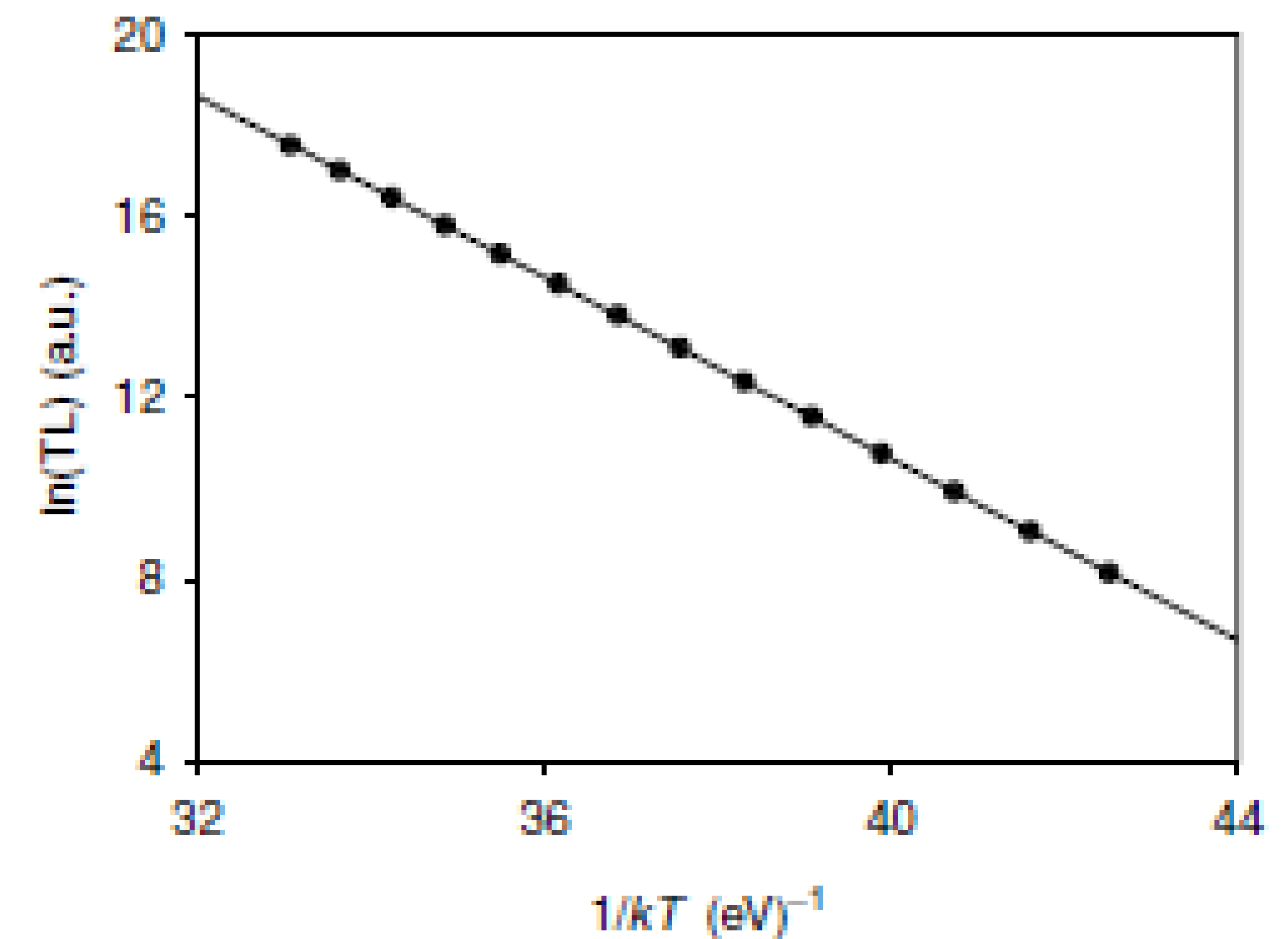
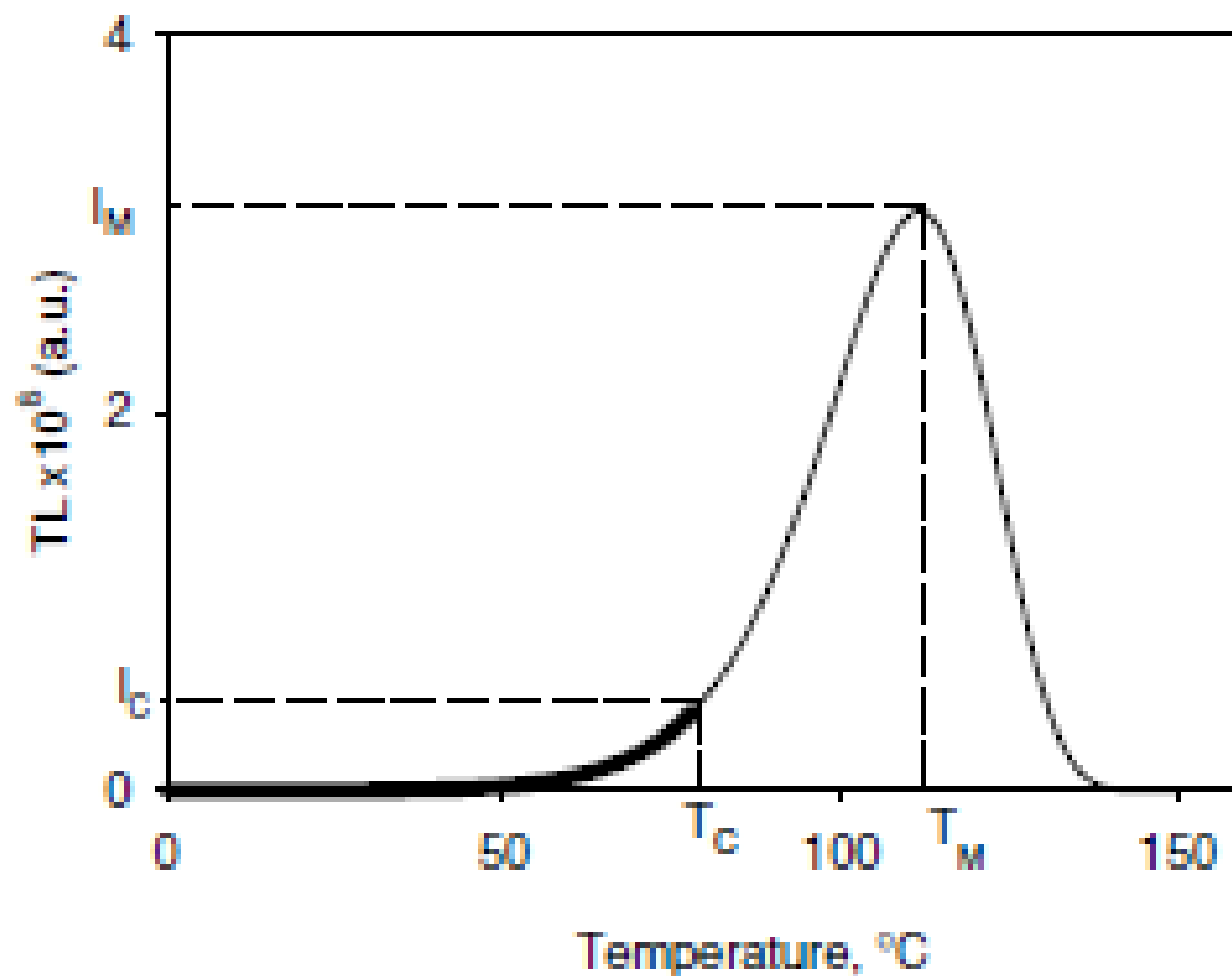
DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



Métodos de análisis de la curva *glow*

Método de subida inicial

$$I(T) \propto \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$



Parte de subida inicial de una curva *glow* TL.

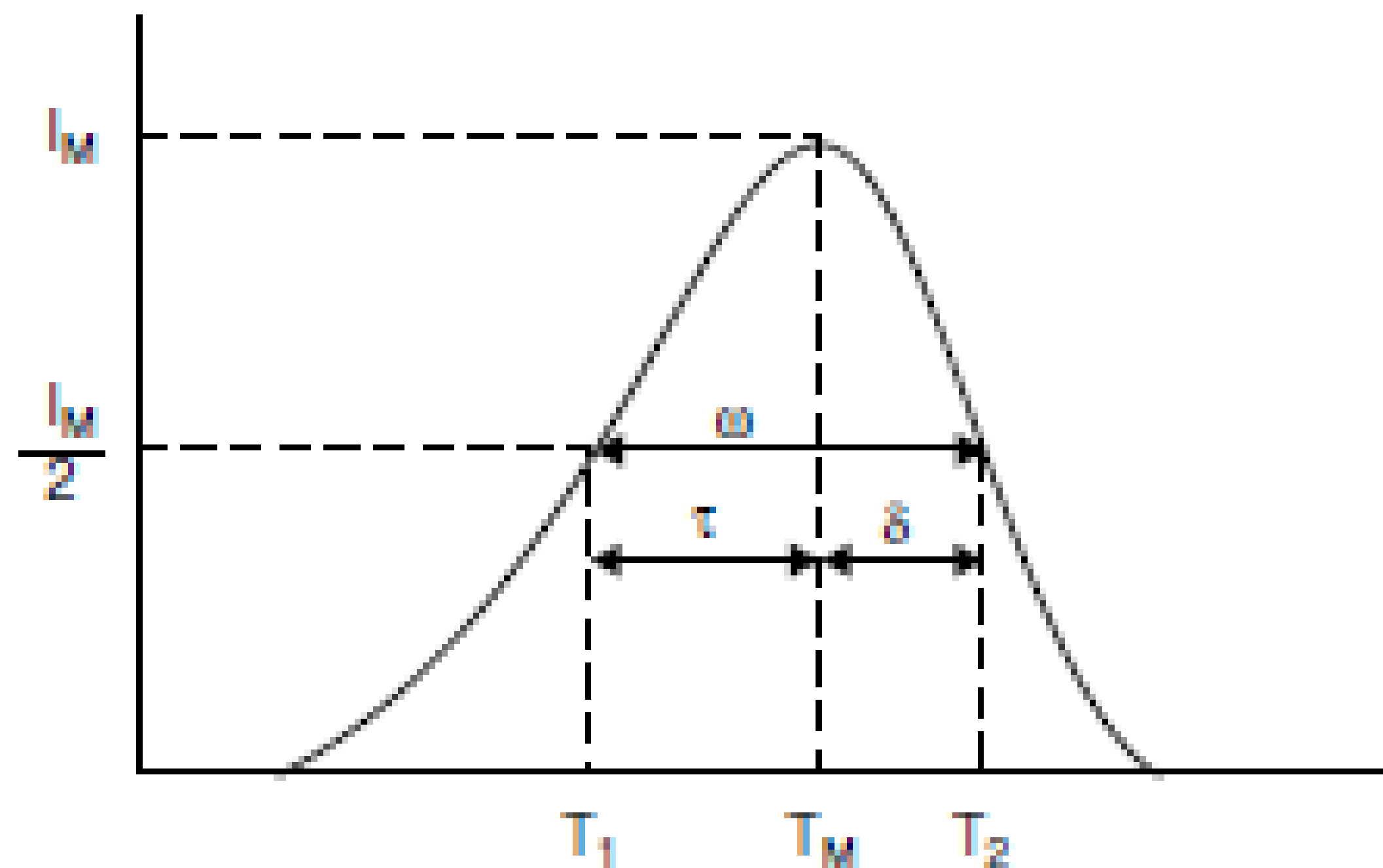
Aplicación de la técnica de subida inicial a la curva de la figura de la izquierda.

DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



Métodos de análisis de la curva *glow*

Método de análisis basado en la forma de la curva *glow*.



Magnitudes geométricas de forma τ , δ , ω

$$\mu = \frac{\delta}{\omega} \quad \text{Factor de simetría o factor de forma geométrica}$$

Ecuaciones empíricas de Chen, E [eV]

$$E = 1,51 \frac{kT_M^2}{\tau} - 1,58(2kT_M)$$

$$E = 0,976 \frac{kT_M^2}{\delta}$$

$$E = 2,52 \frac{kT_M^2}{\tau} - 2kT_M$$

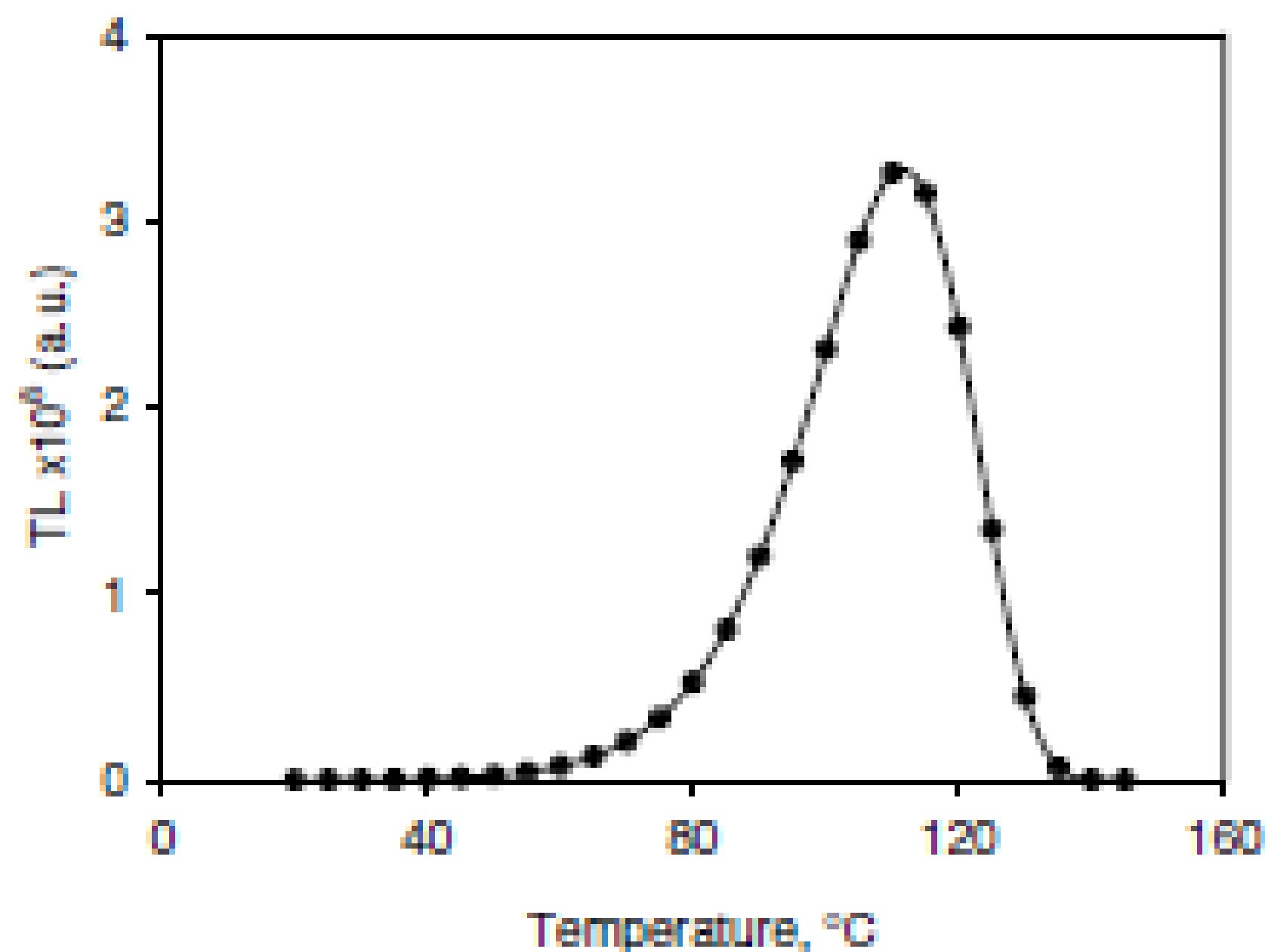
DETECTORES TERMOLUMINISCENTES



Métodos de análisis de la curva *glow*

Deconvolución de la curva *glow* con la ecuación de Kittis.

$$I(T) = I_M \cdot \exp \left[1 + \frac{E}{kT} \cdot \frac{T - T_M}{T_M} - \frac{T^2}{T_M^2} \cdot \left(1 - \frac{2kT_M}{E} \right) \cdot \exp \left(\frac{E}{kT} \cdot \frac{T - T_M}{T_M} \right) - \frac{2kT_M}{E} \right]$$



$$FOM = \frac{\sum |y_{experimental} - y_{fit}|}{\sum y_{fit}}$$

DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



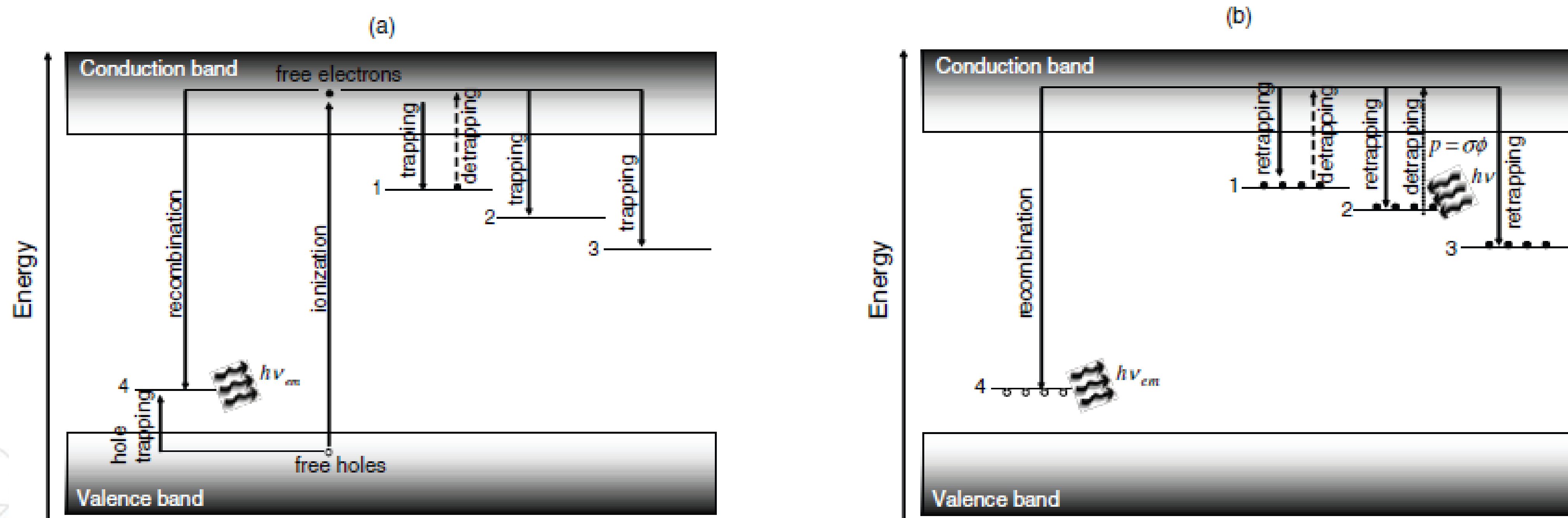
Introducción

- Es una alternativa a la dosimetría TLD con la ventaja de re-análisis (mantienen la información una vez leídos).
- Están compuestos por cristales de óxido de aluminio dopado con carbono ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$).
- El principio de funcionamiento es idéntico a los TLDs excepto por el hecho de que la lectura se realiza por iluminación controlada en lugar de por calentamiento.
- Tienen alta sensibilidad, son de lectura rápida y tienen la posibilidad de volver a estimar la dosis absorbida.
- La cantidad de exposición de la radiación se determina mediante la estimulación del cristal con luz verde de un láser de diodos. La luz azul emitida por el cristal es proporcional a la cantidad de radiación expuesta y pueden ser fotones de alta o baja energía, así como electrones.

DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Introducción



Posibles transiciones electrónicas entre niveles de energías del dosímetro durante (a) la irradiación y (b) las etapas de lecturas

DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)

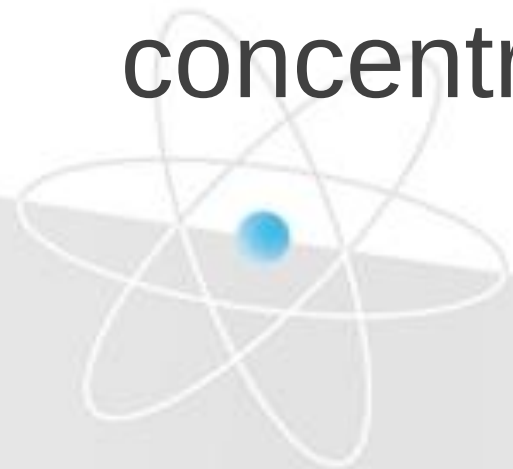


Fundamento teórico

- Las cargas atrapadas pueden ser liberadas a la banda de conducción o a la banda de valencia por estimulación térmica u óptica. En el caso de estimulación óptica, la probabilidad de liberarlos, p , es el producto de la fluencia de fotones, ϕ , y la sección eficaz de fotoionización, σ , que describe la probabilidad de que un fotón con energía $h\nu$ interactúe con un determinado defecto “trampa”.

$$p = \sigma \cdot \phi$$

- La OSL está asociada con un nivel de captura en particular, el cual es proporcional a la concentración de cargas atrapadas, e idealmente a la dosis absorbida de la radiación.



DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Fundamento teórico

- Una vez expuesto el cristal a la radiación ionizante, almacena energía, que se libera como luz de $\lambda = 410$ nm, independientemente del período de tiempo en el que se mida.
- Si se estimula con luz próxima a los 500 nm, la intensidad de la luminiscencia (I_{OSL}), depende de cuánta dosis absorbió el cristal (la concentración de huecos creada, m) así como de la intensidad de luz estimulante (dada por la eficiencia de luminiscencia, η)



$$I_{OSL} = -\eta \cdot \frac{dm}{dt}$$

DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



La señal OSL

- El cristal se encuentra en equilibrio, es decir, existe la misma concentración de electrones n que de huecos y todos los centros son radiativos:

$$I_{OSL} = -\frac{dn}{dt}$$

- Ningún electrón será atrapado de nuevo; así, la intensidad será proporcional a la concentración de electrones, la sección eficaz de fotoionización σ y la fluencia de la luz de excitación ϕ :

$$I_{OSL} = n \cdot \sigma(\lambda) \cdot \phi(\lambda)$$



DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



La señal OSL

- Combinando las ecuaciones anteriores, resulta la intensidad de la señal OSL expresada de la siguiente manera:

$$I_{OSL} = I_{OSLo} \cdot e^{(-t/\tau)}$$

donde τ representa el tiempo de vida y viene dado por la siguiente expresión:

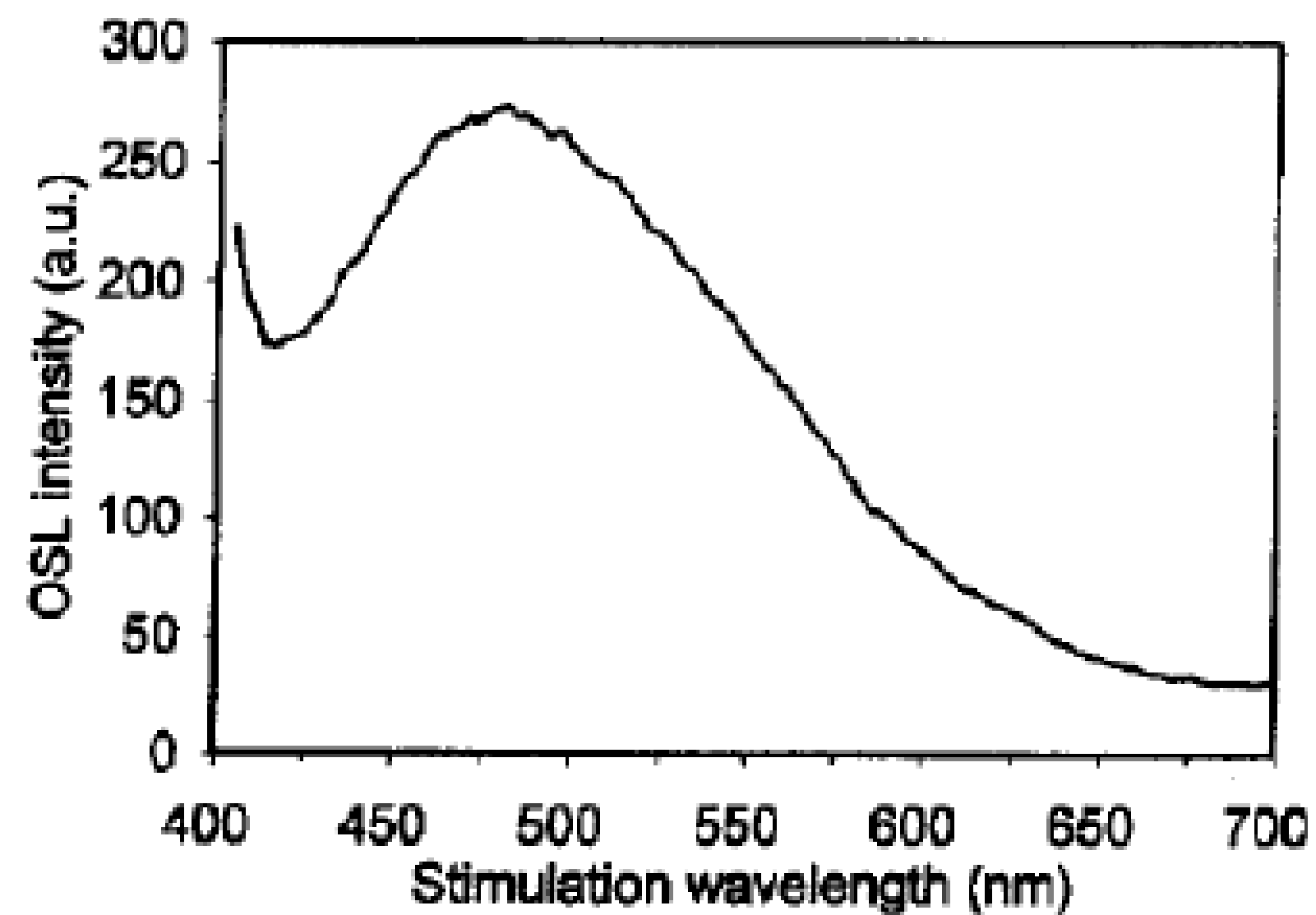


$$\tau = (\sigma(\lambda) \cdot \phi(\lambda))^{-1}$$

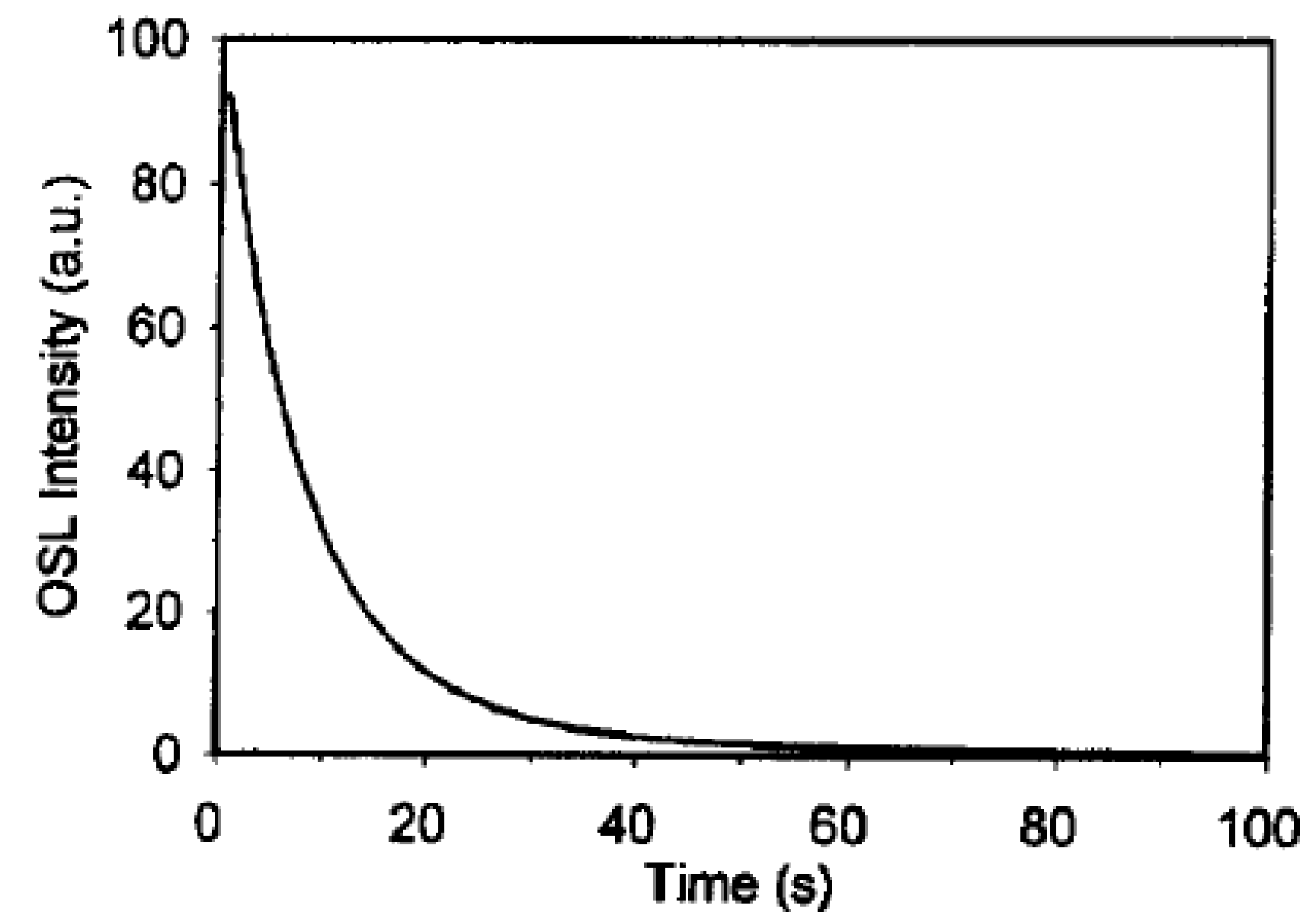
DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



La señal OSL



Intensidad de la señal OSL en u.a. en función de la longitud de onda de la luz de estimulación en nanómetros.



Intensidad de la señal OSL en u.a. en función del tiempo de estimulación en segundos.



DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



La señal OSL

- El modelo teórico predice un decaimiento exponencial, pero en realidad esto no es así debido a los procesos físicos que tienen lugar. Un modelo que se aproxima algo más a la realidad tiene en cuenta las trampas superficiales y profundas, tal como lo describe la ecuación:

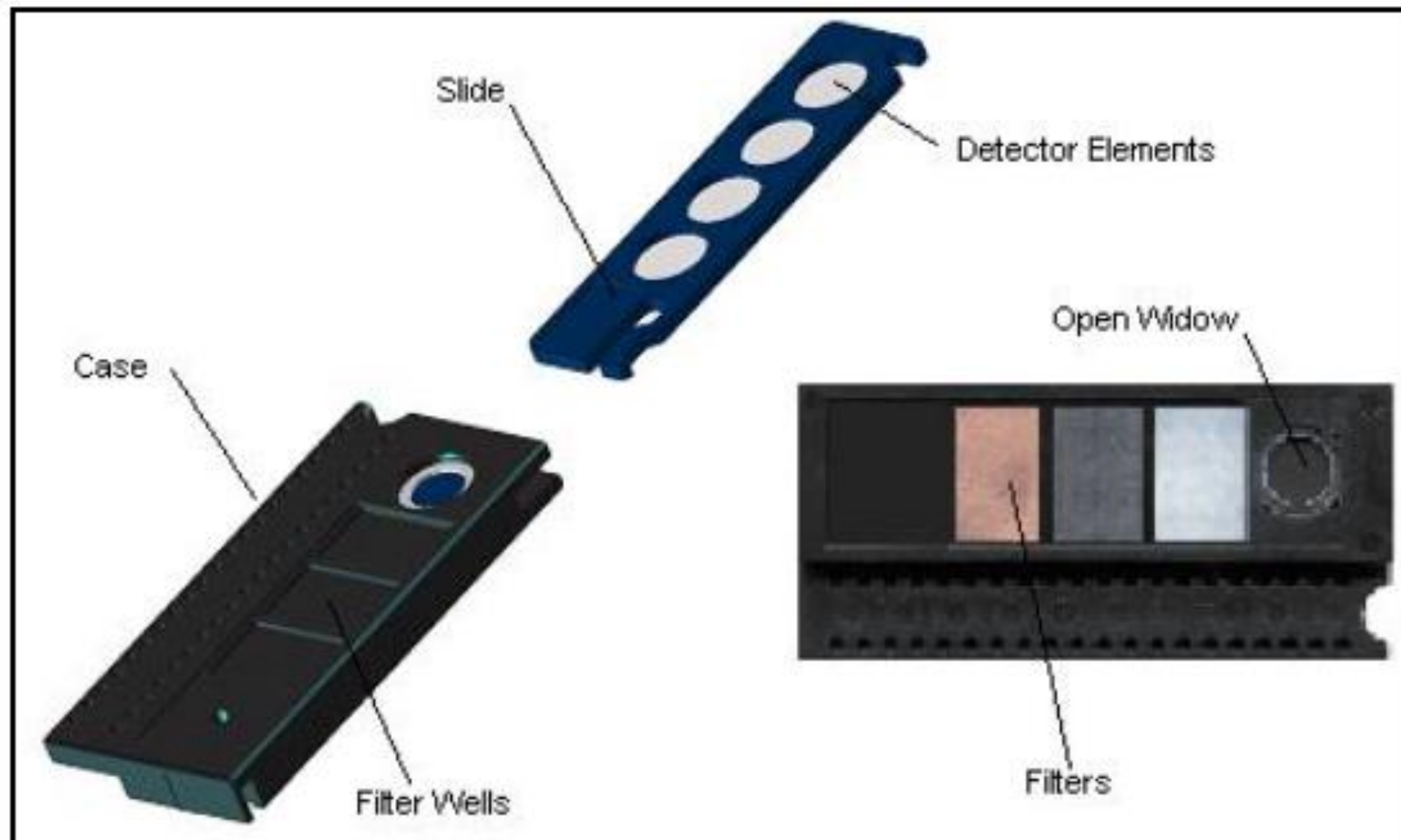
$$I_{OSL}(t) = I_{OSLo} \cdot e^{(-t/\tau)} + a_1 \cdot e^{(-\frac{E}{kT})} - a_2(t)$$

- a_1 : describe la acción de las trampas superficiales
- E : las trampas profundas
- T : la temperatura
- K : constante de Boltzmann
- $a_2(t)$: influencia de la dependencia del tiempo de las trampas profundas.

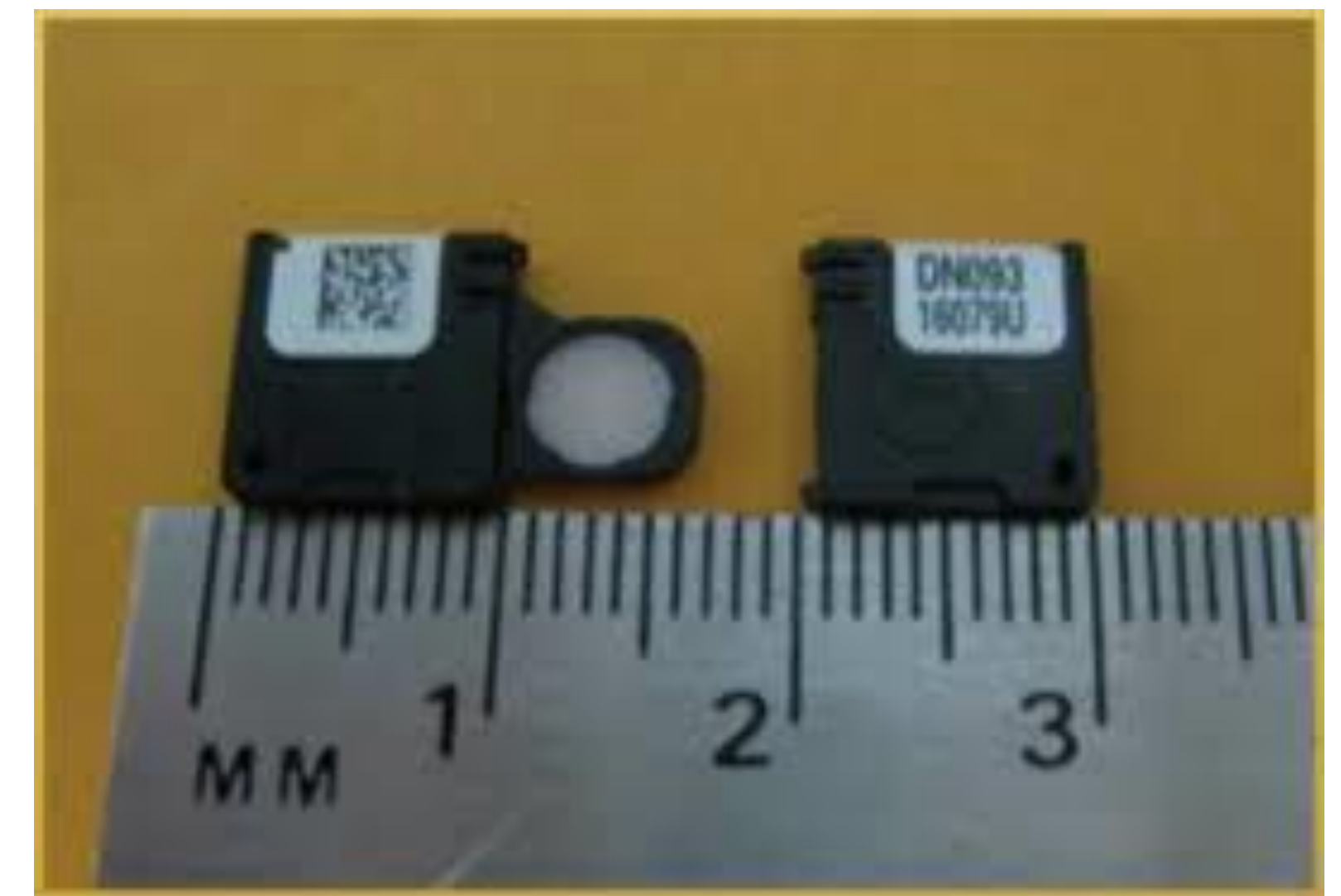
DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Dosímetros OSL Inlight Modelo 2



Dosímetros OSL nanoDot



DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Dosímetros OSL Inlight Modelo 2

El material OSL responde tanto a los fotones como a los electrones y no es sensible a la radiación de neutrones. Este material se encuentra distribuido en las posiciones:

- | | | |
|--------------------|------|----|
| 1) Ventana abierta | (VA) | E1 |
| 2) Plástico | (PL) | E2 |
| 3) Aluminio | (Al) | E3 |
| 4) Cobre | (Cu) | E4 |



DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Dosímetros OSL Inlight Modelo 2

Características físicas del *slide*

Material	Dimensión [mm]			Masa [g]	Densidad del cristal [g/cm ³]	Número atómico efectivo
	Largo	Ancho	Espesor			
Plástico ABS y cristales de Al ₂ O ₃ :C	47	11,5	1,5	0,8	3,97	10,2



DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Dosímetros OSL Inlight Modelo 2

Características físicas del case

Dimensión [mm]			Masa [g]
Largo	Ancho	Espesor	
49	22,5	5	4,24

Filtración total de los dosímetros Inlight Modelo 2

	Espesor [mg/cm²]			
	VA	PL	Al	Cu
Anverso	30	298	398	568
Reverso	15,6	283,6	383,7	553,8



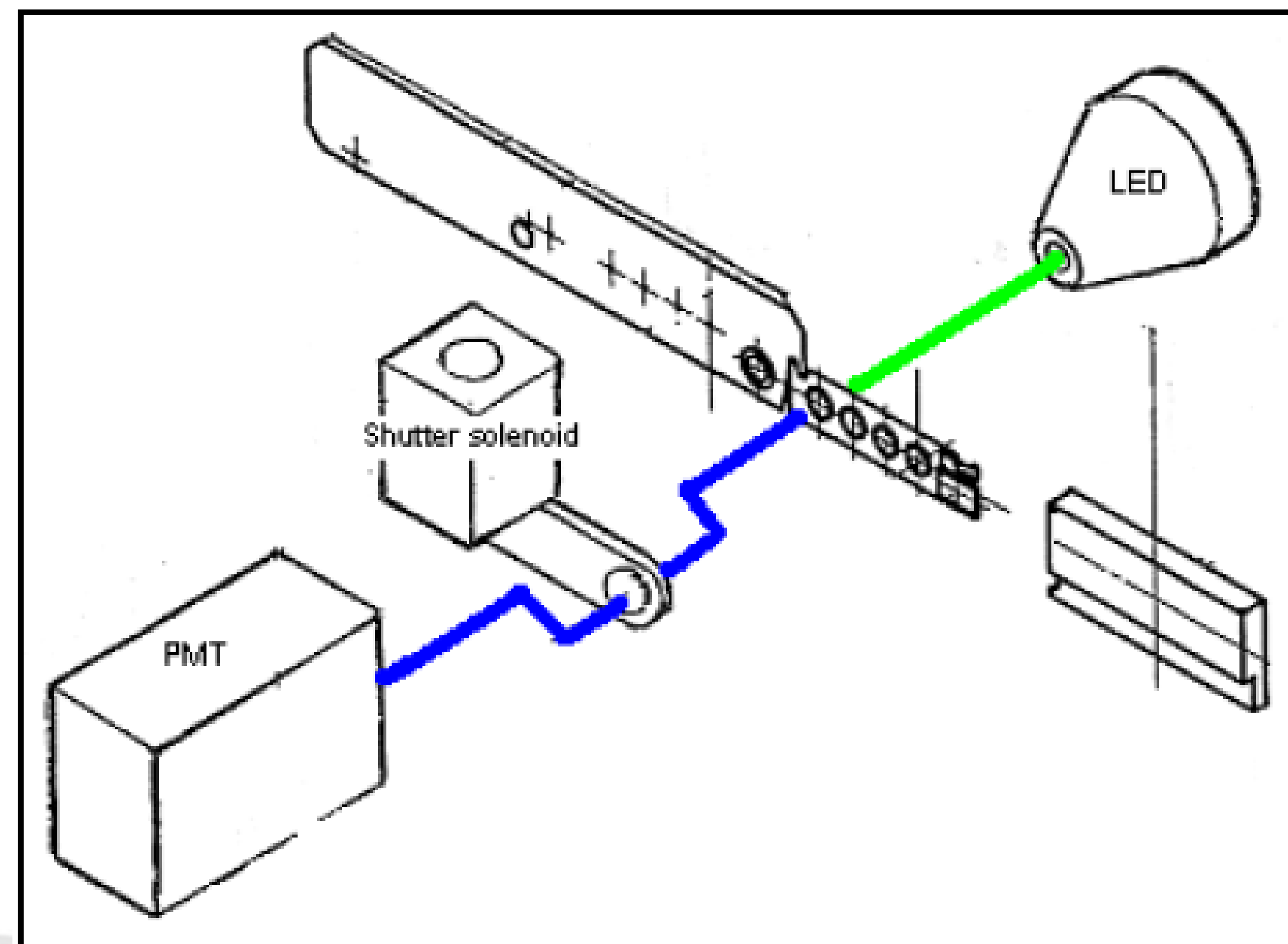
DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Instrumentos y técnica de medida



Lector MicroStar para el sistema Inlight



Mecanismo de estimulación y excitación

DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Calibración

$$Fondo = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \left(\frac{1}{N S_j} \sum_{i=1}^N C_i \right)$$

L = Número de dosímetros sin irradiar.

N = Número de posiciones de lectura por dosímetro.

C_i = Cuentas de cada ventana.

S_j = Sensibilidad del dosímetro j .

$$Factor\ de\ calibración = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{1}{E_j} \left(\frac{1}{N S_j} \sum_{i=1}^N C_i - Fondo \right)$$

M = Número de dosímetros irradiados.

E_j = Dosis de cada dosímetro j .



DOSIMETRÍA POR LUMINISCENCIA ÓPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)



Corrección por calibración del sistema

$$\text{Lectura calibrada} = \frac{\text{Lectura bruta}}{\text{Factor de calibración del lector} * \text{Sensibilidad}}$$

Corrección por fondo



$$\text{Dosis (mSv)} = \text{Lectura calibrada} - \text{Lectura calibrada del fondo}$$



Muchas gracias.





Comisión Nacional de Energía Atómica

Pablo Andres
División Protección Radiológica
Gerencia Ingeniería Nuclear
Centro Atómico Bariloche

andresp@cab.cnea.gov.ar

