

# Curso: “Dosimetría personal externa”

UNIDAD 4. Dosimetría Externa

**Conferencia No. 4.2**

**ESPECIFICACIONES      FUNCIONALES  
PARA LOS DOSIMETROS PERSONALES**

Daniel Molina Pérez  
MSc. Ing. Físico Nuclear



FACULTAD DE  
**CIENCIAS**  
UDELAR | [fcien.edu.uy](http://fcien.edu.uy)



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# OBJETIVOS

Conocer algunas de las especificaciones funcionales para los dosímetros personales empleados para evaluar la exposición externa

# Contenido

## Repaso sobre los Niveles de Referencia

## Especificaciones funcionales para dosímetros personales:

- Requisitos de Exactitud y Precisión
- Estimación de incertidumbres
- Requisitos sobre umbrales de dosis mínima

# Niveles de Referencia

# Nivel de Referencia

**Nivel de referencia:** Valor predeterminado para la magnitud medida por encima del cual se debería tomar alguna acción o decisión especificada

- ✓ Los niveles de referencia frecuentemente están referidos a la *dosis efectiva*, pero pueden aplicarse a otras magnitudes. Se llaman *niveles de referencia derivados*.
- ✓ Un nivel de referencia no constituye un límite por si solo.

# Tipos de Niveles de Referencia

El nivel de la acción de referencia puede variar desde solo registrar el valor hasta la intervención:

- Nivel de Registro



- Nivel de Investigación



- Nivel de Actuación



# Nivel de Registro

- Dosis por encima de la cual se requiere el registro (ICRP)

$$R = L \cdot \frac{PM}{12}$$

Las dosis por debajo del nivel de registro no serán incluidas en las evaluaciones de exposición ocupacional de los trabajadores.

- ✓ Despreciar las dosis bajas no ayuda a motivar a los trabajadores y la dirección a mejorar la protección radiológica y a esforzarse por lograr la exposición más baja posible de los individuos
- ✓ Puede ser útil registrar todas las dosis por encima del límite de detección,
- ✓ Sin embargo, no se debe prestar atención desmedida a exposiciones que resultan tan pequeñas
- ✓ Se recomienda que se tome el nivel mínimo de detección del sistema dosimétrico como nivel de registro; por debajo de ese nivel los resultados se consideran iguales a cero.

# Nivel de Investigación

- Valor de la magnitud por encima del cual habrá que examinar la causa o implicaciones del resultado
- Frecuentemente es apropiado establecer el nivel de investigación igual a **3/10 de la fracción del límite anual pertinente, correspondiente al período de monitoreo empleado.**

Para un período de monitoreo o intercambio mensual,

$$NI = 20 \text{ mSv} \times 0.3 / 12 = 0.54 \text{ mSv}$$

Por debajo del nivel de investigación, no es necesario ninguna revisión adicional.

# Nivel de Actuación

- ✓ Nivel para el cual son necesaria acciones protectoras o remediales.
- ✓ Se aplican a exposiciones crónicas o a situaciones de emergencia.
- ✓ Los niveles de acción a menudo sirven para proteger al público.
- ✓ Son relevantes para la exposición ocupacional en situaciones crónicas (particularmente importante para el caso de la exposición al Radón en el puesto de trabajo).

El nivel de actuación para el radón en el lugar de trabajo se da en la Normas como una concentración media anual de 1000 Bq/m<sup>3</sup>, la cual normalmente equivaldría a una **dosis efectiva anual de alrededor de 6 mSv**.

# Especificaciones dosimétricas

## Exactitud y Precisión

# Especificaciones dosimétricas

- ✓ Las especificaciones funcionales esenciales de los dosímetros personales deberían corresponder a los **objetivos de la monitorización individual**.

## Objetivo básico de la dosimetría personal:

Proporcionar una medición fiable de las **magnitudes operacionales**  $H_p(10)$ ,  $H_p(3)$  y  $H_p(0,07)$  en casi **todas las situaciones prácticas, independientemente del tipo, la energía y la dirección de incidencia de la radiación** y con una **exactitud global prescrita**.

# Exactitud y Precisión

# Declaración de la CIPR

(párrafo 271, Publicación 60: 1991)

- ✓ La Comisión ha observado que, en la práctica, es posible normalmente lograr una exactitud del orden del **10 %**, con un nivel de confianza del **95 %**, en las mediciones de campos de radiación en buenas condiciones de laboratorio
- ✓ En el lugar de trabajo, donde generalmente **no se conocen bien ni el espectro energético ni la orientación del campo de radiación**, las incertidumbres de una medición hecha con un dosímetro personal serán **significativamente mayores**.
- ✓ La **no uniformidad y la orientación incierta del campo** introducirán errores en el uso de los modelos tipo.
- ✓ La **incertidumbre global**, al nivel de confianza del **95 %**, en la estimación de la **dosis efectiva en torno al límite de dosis** pertinente puede **fácilmente ser de un factor de 1,5** en ambas direcciones para los fotones, y bastante más alta para los neutrones de energía desconocida y los electrones.
- ✓ También son inevitables las incertidumbres mayores en los niveles bajos de dosis efectiva para todos los tipos de radiación.

# Declaración de la CIPR

Esta declaración se aplica a Magnitudes de Protección Radiológica:

- Dosis efectiva (E)
- Dosis equivalente (HT)

Se interpreta normalmente que para un grupo amplio de trabajadores que utilizan un sistema dosimétrico dado, el 95% de las dosis anuales registradas deben estar dentro de los límites de incertidumbre aceptable indicados.

Para las dosis inferiores al límite de dosis anual pertinente, puede aplicarse también a las magnitudes operacionales, debería interpretarse en el sentido de que:

“en los niveles del orden de los límites de dosis anuales, las dosis anuales aparentes recibidas por una persona ( $H_p(10)$ , la  $H_p(3)$  y la  $H_p(0,07)$ , indicadas por una serie de dosímetros básicos expedidos regularmente durante el año y llevados en la superficie del cuerpo— **no deberían diferenciarse en más de -33 % o +50 % (al nivel de confianza del 95 %) de las dosis personales equivalentes que indicaría un dosímetro ideal** colocado en el mismo lugar en los mismos momentos”.

# Criterios ICRU (ICRU 47)

## Mediciones aisladas de las Magnitudes Operacionales:

“en la mayoría de los casos, una incertidumbre global de una **desviación típica del 30 % debería ser aceptable**. ... el error de los instrumentos puede superar sustancialmente este límite a algunas energías y para ciertos ángulos de incidencia, pero se mantendrá dentro de él cuando se trate de un campo de radiación con un amplio espectro de energías y una amplia distribución angular”.

# Nivel de Registro

La Comisión considera que el nivel de registro para la vigilancia radiológica individual debe deducirse de la duración del período de vigilancia y de una dosis efectiva anual no inferior a 1 mSv o una dosis equivalente anual de alrededor del 10% del límite de dosis aplicable".

Dosis que estén justo por debajo de este nivel de registro no se incluirán en los registros de dosis del trabajador



Será aceptable una incertidumbre absoluta  $R$  (en términos de la dosis), dada por:

$$R = L \cdot \frac{PM}{12}$$

$L = 1$  mSv o 10 % límite  $H_T$   
 $PM$  = período de monitores

$H_p(10)$ :  $R = 0.17$  mSv (EUR 73),  $R = 0.085$  mSv (ICRP-75)  $PM = 1$  mes

$H_p(0.07)$ :  $R = 4.20$  mSv (EUR 73, ICRP-75)  $PM = 1$  mes

- Establece un criterio de exactitud realista para la medición de las dosis en el intervalo de las dosis bajas.
- Por consiguiente, el nivel mínimo de detección debería ser por lo menos equivalente al nivel de registro.

# Nivel de precisión aceptable

Las recomendaciones de la CIPR establecen niveles aceptables de precisión a dos niveles de dosis:

- a) En la **región próxima al límite de dosis** correspondiente, se considera aceptable un factor de 1,5 en cualquier dirección;
- b) En la **región del nivel de registro** está implícita una incertidumbre aceptable de 100%.

Función  
discontinua

Procedimiento  
de suavización:

Se adopta recomendación sobre precisión aceptable en el **rango de dosis intermedia**.  
**Publicación 35 (CIPR).**

Recomienda un **factor de dos en cualquier dirección** como una precisión aceptable para **dosis de alrededor de un quinto del límite de dosis aplicable**.

# Nivel de precisión aceptable

El intervalo de precisión permisible como función del nivel de dosis puede expresarse :

$$\left(\frac{H_m}{H_t}\right)_{LIMITE-SUPERIOR} = 1.5 \cdot \left(1 + \frac{H_0}{2H_0 + H_t}\right)$$

$$\left(\frac{H_m}{H_t}\right)_{LIMITE-INFERIOR} = 0 \quad , \quad H_t < H_0$$

$$\left(\frac{H_m}{H_t}\right)_{LIMITE-INFERIOR} = \frac{1}{1.5} \cdot \left(1 - \frac{2H_0}{H_0 + H_t}\right) \quad , \quad H_t \geq H_0$$

$H_t$  ... Dosis real convencional

$H_0$  ... Dosis mas baja que se requiere medir

# Nivel de precisión aceptable

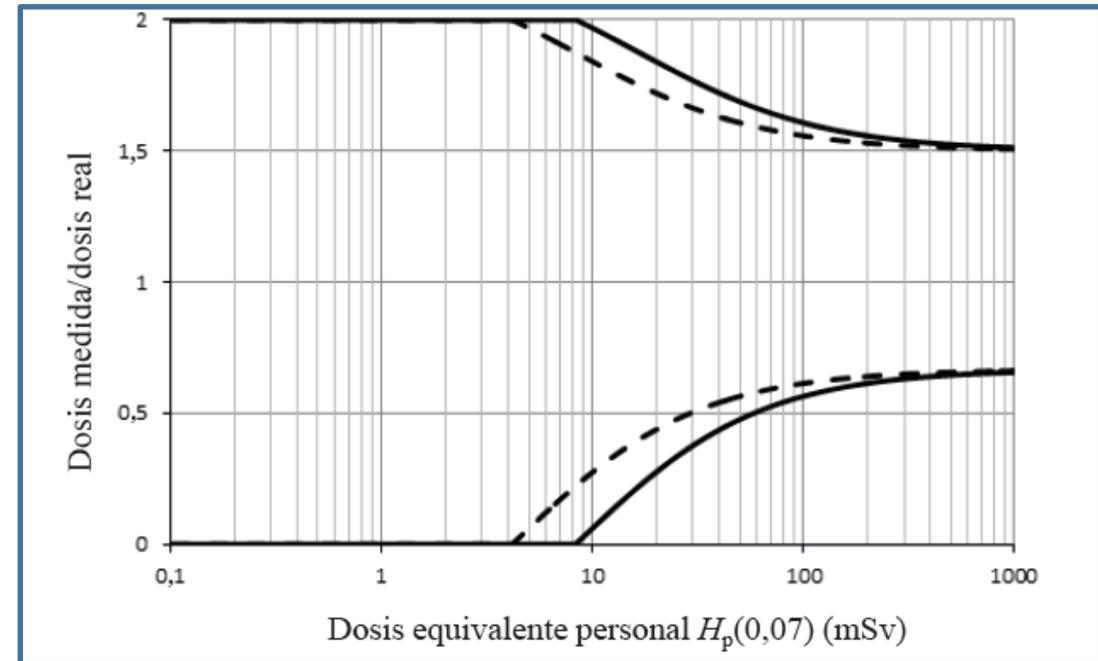
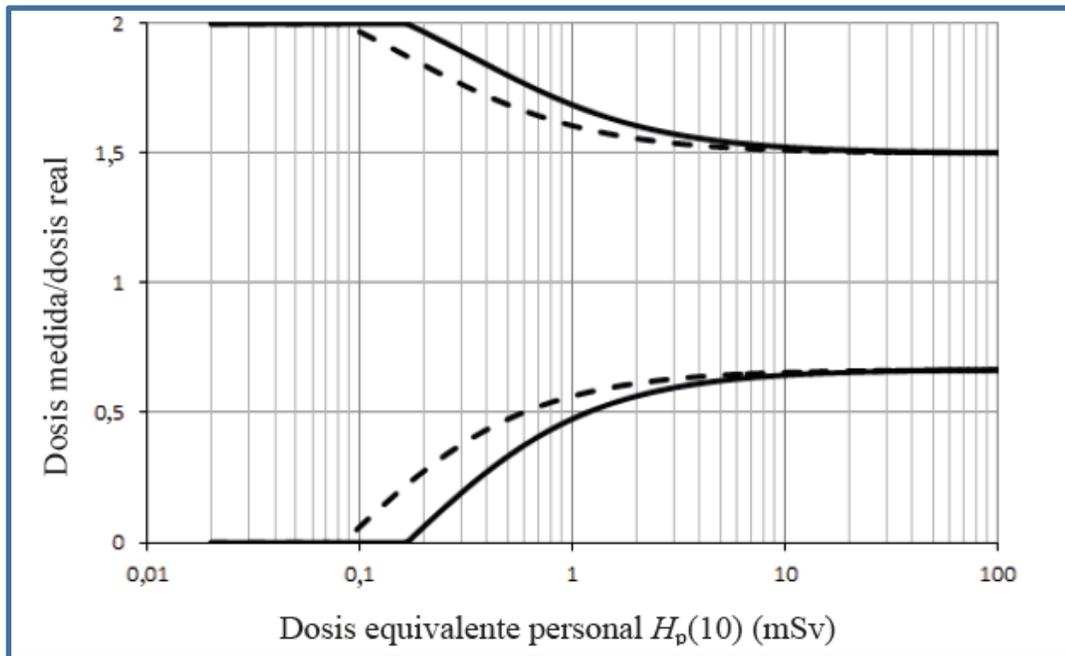
- El Nivel de Registro depende, de la Magnitud a medir y del Periodo de Monitoreo

## Periodo Mensual

| Magnitud | $H_o$ (mSv) | Criterio  |
|----------|-------------|---|
| Hp(10)   | 0.08        | 1 mSv ecuación para R                           |
| Hp(0.07) | 4.2         | 10 % Limite Anual 500 mSv (extremidades y piel) |
| Hp(3)    | 0.17        | 10 % Limite Anual 20 mSv (cristalino)           |

# Intervalos de exactitud para Hp(10) y Hp(0,07)

Obsérvese que cualquier **cambio en el valor del nivel de registro** influirá en la forma de la **curva en embudo en la región de las dosis bajas**.



**Nota:** Líneas discontinuas: períodos de monitorización de 1 mes; líneas continuas: períodos de monitorización de 2 meses.

# Requisitos para el Nivel de precisión aceptable

- ✓ Los criterios funcionales presentados deberían utilizarse para demostrar el cumplimiento de las recomendaciones de la ICRP [56] con respecto a la exactitud global.
- ✓ Sin embargo, está claro que los requisitos nacionales pueden exigir la adopción de otros criterios, que podrían ser más estrictos o tener un rigor matemático mayor, a los efectos de la acreditación y de las pruebas de funcionamiento.
- ✓ Para las dosis en las extremidades causadas por la exposición a electrones o positrones de baja energía, la exactitud requerida es alcanzable con algunos diseños de dosímetros, pero puede haber dificultades, relacionadas principalmente con el espesor del detector y/o la cobertura.

En la práctica, el criterio de precisión global de los dosímetros personales puede encontrarse estableciendo criterios para una serie de parámetros que influyen en el funcionamiento del dosímetro:

- ✓ - su respuesta al tipo de radiación,
- ✓ - la distribución direccional y espectral y la
- ✓ - influencia del medio ambiente

# Estimación de Incertidumbres

# Análisis de incertidumbres

- ✓ La determinación de la incertidumbre en la medición es la base para cuantificar la exactitud de los resultados obtenidos.
- ✓ El Comité Conjunto de Guías en Metrología ha publicado orientaciones internacionales sobre los aspectos metrológicos de la dosimetría.
- ✓ Los dos documentos de referencia fundamentales son las publicaciones:
  - ❑ *International Vocabulary of Metrology: Basic and General Concepts and Associated Terms*
  - ❑ *Evaluation of Measurement Data: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*

Para evaluar la incertidumbre, deberían utilizarse:

- ❑ Conocimientos teóricos y experiencias
- ❑ Resultados de las pruebas tipo hayan aportado sobre el dosímetro y su sistema de evaluación
- ❑ Información facilitada por el cliente, por ejemplo sobre las condiciones locales de exposición y de almacenamiento.

# Metodología GUM

Para la evaluación de la incertidumbre debería utilizarse un modelo matemático del sistema de dosimetría. Este modelo puede expresarse como sigue:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots) = f(X)$$

donde  $Y$  es la magnitud medida o de salida, por ejemplo, la  $H_p(10)$ , y

$X$  es una matriz que contiene los datos de entrada y las magnitudes que influyen en el sistema de medición.

**1) Formulación:**

**2) Cálculo:**

- a) Definición de la magnitud de salida  $Y$ .
- b) Determinación de las magnitudes de entrada de la matriz  $X$

**Afectan al valor de la magnitud de salida (características del campo de radiación y del sistema)**

- i. tasa de dosis, la energía y el ángulo de incidencia;
- ii. características del sistema de medición (respuesta en función de la energía y el ángulo, el desvanecimiento del dosímetro y las características de su sistema de evaluación, como la temperatura del revelador y la sensibilidad del lector);
- iii. características del sistema de calibración;
- iv. la dosis causada por la exposición a la radiación de fondo natural,

- c) Modelo que relacione las magnitudes de entrada con la de salida

**Disponible (algoritmo para calcular la dosis a partir de la lectura y parámetros tales como factores o coeficientes de calibración y normalización.**

d) Asignación de una función de densidad de probabilidad a cada una de las magnitudes de entrada.

Utilizar toda la información disponible sobre el sistema dosimétrico y las condiciones de medición.

**PROCESO COMPLEJO: REQUIERE CONOCIMIENTOS Y EXPERIENCIA**

### Asignación de la Función Densidad de Probabilidad

- Tipo A. Pueden ser evaluados de las distribuciones estadísticas de los resultados de series de mediciones y pueden ser caracterizados por desviaciones estándar experimentales. Ejemplo: homogeneidad del lote de dosímetros, reproducibilidad de las lecturas del lector.
- Tipo B. No pueden ser evaluados mediante el análisis estadístico de los resultados de una serie de observaciones. Aunque pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, son evaluados de distribuciones de probabilidad asumidas sobre la base de la experiencia o de alguna información. Ejemplo: dependencia energético – angular, fading.

## Componentes de la incertidumbre. Ejemplos

| Tipo A  | Tipo B   |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. No homogeneidad del lote de dosímetros.</li><li>2. Variabilidad en las lecturas del lector debido a su limitada sensibilidad y a los niveles de fondo</li><li>3. Variación en la lectura cero del detector</li></ol> | <ol style="list-style-type: none"><li>1. Dependencia energética y angular de los dosímetros</li><li>2. No linealidad de la respuesta</li><li>3. Fading, dependiente de la humedad y la temperatura</li><li>4. Efectos por exposición a la luz</li><li>5. Errores de calibración</li><li>6. Efectos de la exposición a otros tipos de radiaciones</li></ol> |

Propagación de las funciones de densidad de las magnitudes de entrada a través del modelo de medición  $Y = f(X)$  hasta obtener una función de densidad de la salida.

- A partir de esta función de densidad deberían calcularse las siguientes magnitudes estadísticas
  - a) el valor previsto, que es el valor central de la función de densidad de probabilidad, tomado como estimación y de la dosis  $Y$ ;
  - b) la desviación típica, que se considera la **incertidumbre combinada** de  $uc(y)$  en la dosis  $Y$ ;
  - c) un intervalo de cobertura que contenga  $Y$  con una probabilidad especificada.

La **incertidumbre global** del sistema determinada por los efectos resultantes de los dos tipos de incertidumbre (Tipo A, aleatorio, y Tipo B, sistemático).

ISO recomienda combinar incertidumbres del Tipo A y las del Tipo B por suma de cuadrados para obtener la incertidumbre total.

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

$U_C$ ...Incertidumbre combinada

$U_A$ ... Incertidumbre estándar Tipo A

$U_B$ ... Incertidumbre estándar Tipo B

$$U_B = \sqrt{\sum_i U_{B,i}^2}$$

$U_{B,i}$ ...Incertidumbre estándar individual  $i$  Tipo B

$U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_{B,i}$  en términos de la desviación con relación a la dosis medida:

$$(H_m - H_t) / H_t$$

# Estimación de incertidumbres

- ✓ La ISO recomienda que las incertidumbres del Tipo B,  $U_B$ , se caractericen por desviaciones tipo y varianzas a partir de asignarles determinada función de distribución de densidad de probabilidad.
- ✓ En este caso, es frecuente asumir para las incertidumbres Tipo B una distribución de densidad de probabilidad del tipo rectangular, para la cual la incertidumbre estándar ( $U_{B,i}$ ) puede determinarse como:

$$U_{B,i} = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$$

Donde  $a_i$  es el semi ancho del intervalo de valores que puede tomar el parámetro

$$a_i = (a_{i+} - a_{i-})/2$$

Ejemplo: fading inferior al 20% en 60 días

  $U_{B,fading} = 0.06$

# Estimación de incertidumbres

- ✓ La incertidumbre tipo combinada tiene todavía el carácter de una desviación típica.
- ✓ Si se admite que tiene una densidad de probabilidad Gaussiana (normal), entonces una desviación tipo a cada lado de la media corresponde a un límite de confianza de un 68%.
- ✓ Por tanto, es necesario a menudo multiplicar la incertidumbre tipo combinada por un factor adecuado, llamado factor de cobertura  $k$ , para obtener una incertidumbre expandida (conocida también como “incertidumbre global”).
- ✓ Los valores típicos del factor de cobertura son 2 o 3, para los límites de confianza de aproximadamente 95% o 99% respectivamente. **El valor numérico tomado para el factor de cobertura debe indicarse claramente.**

Una incertidumbre de -33% a +50% para un nivel de confianza del 95% (correspondiente a un factor de cobertura  $k=1.96$ ) puede alcanzarse si:

$$1.96 \cdot U_C \leq (0.33 + 0.50) / 2$$



$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \leq 0.21$$

La aceptación del sistema dosimétrico no implica el cumplimiento de criterios predefinidos para cada parámetro de forma independiente, sino que los efectos combinados de las incertidumbres están dentro de ciertos límites. Ejemplo, si:

$$U_B = \sqrt{U_{B(E,\alpha)}^2 + U_{B(0)}^2}$$

$U_{B(E,\alpha)}$  ... Desviación estándar resultante de la dependencia energético angular

$U_{B(0)}$  ... Desviación estándar resultante del resto de las incertidumbres de Tipo B

$$\sqrt{U_A^2 + U_{B(E,\alpha)}^2 + U_{B(0)}^2} \leq 0.21$$

Acorde con esta ecuación puede ser calculado  $\Delta$ , el valor máximo permisible para  $U_{B(E, \alpha)}$

$$\Delta = \sqrt{0.21^2 - U_A^2 - U_{B(0)}^2}$$

Si  $U_A = U_{B(0)} = 0.10$ , entonces  $\Delta = 0.16$



Nivel máximo de incertidumbre correspondiente a la dependencia energético - angular, para un 95% de confianza es:

$$\pm 1.96 \Delta = \pm 0.30$$

# Estimación de incertidumbres

## Criterios de funcionamiento

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + \sum_i U_{B,i}^2} \leq 0.21 \quad \longleftrightarrow \quad U_c^2 = U_A^2 + \sum_i U_{B,i}^2 \leq 0.044$$

Acorde con esta ecuación, para cumplir con los requisitos de desempeño, el sistema no debe contener más de:

- 1 fuente de error con  $U_i = 0.20$ ;
- o 2 fuentes de error con  $U_i = 0.15$ ;
- o 4 fuentes de error con  $U_i = 0.10$ ;
- o 10 fuentes de error con  $U_i = 0.06$ ;
- o 16 fuentes de error con  $U_i = 0.05$ ;
- o 74 fuentes de error con  $U_i = 0.024$

Una mezcla o combinación de errores puede igualmente satisfacer la expresión. Si

$$U_{B(E, \alpha)} \leq 0.16$$

entonces es posible tener 10 fuentes adicionales de error con

$U_i = 0.05$  cada una.

Mayor contribución: dependencia energético - angular y fading ( $U_i > 0.1$ ),

Menor esfuerzo hacia fuentes con  $U_i < 0.025$ .

# Requisitos sobre los umbrales de dosis

# Requisitos sobre los umbrales de dosis

$$D = R_t - \bar{R}_b$$

$D$ ... Dosis neta evaluada

$R_t$ ... Lectura del dosímetro

$\bar{R}_b$ ... Valor promedio de las lecturas de fondo

Límite de decisión ( $L_c$ ) : Nivel de dosis por encima del cual las dosis medidas pueden considerarse como dosis reales no pertenecientes a la población  $R_b$ , con un nivel de confianza dado (generalmente 95%)

$$L_c = t_n \cdot s_b$$

$s_b$ ... Desviación estándar de las mediciones de fondo

$t_n$ ... Factor de student para alcanzar el intervalo de confianza con  $n$  mediciones de fondo.

Ejemplo:  $n=20$   $t_n=1.73$  (95% confianza)

Si  $s_b$  corresponde a distribución normal

$$L_c = 1.645 \cdot s_b$$

# Requisitos sobre los umbrales de dosis

Límite de detección ( $L_D$ ) : Nivel inferior de dosis que puede ser detectado con un grado de confianza dado (generalmente 95%)

$$L_D \approx 2 \cdot t_n \cdot s_b$$

$n = 20$  (95% confianza)  
 $t_n = 1.73$



$$L_D \approx 3.46 \cdot s_b$$

Si  $s_b$  corresponde a  
distribución normal



$$L_D \approx 3.29 \cdot s_b$$

# Requisitos sobre los umbrales de dosis

Límite de determinación ( $L_Q$ ) : Es la dosis más baja que puede ser medida con una precisión dada. La precisión requerida para el nivel de registro (nivel más bajo que se desea cuantificar) es del 100% para un 95% de confianza.

Si  $s_b$  corresponde a distribución normal, con 100% de error para un 95% de confianza



$$L_Q \approx 1.96 \cdot s_b$$

Si  $s_b$  corresponde a distribución normal, con 90% de error para un 95% de confianza



$$L_Q \approx 2.2 \cdot s_b$$

**Implicación práctica:** Para alcanzar un límite de determinación al nivel de registro de 0.15 mSv, la desviación estándar de la población de mediciones de fondo no debe exceder 0.075 mSv.

# Otras especificaciones funcionales

# Otras especificaciones practicas

Además de los criterios numéricos para el funcionamiento de los dosímetros personales, deberían tenerse en cuenta los criterios relativos a su uso en la práctica y los factores económicos. Estos criterios comprenden, entre otras cosas:

- a) el bajo costo;
- b) el bajo peso, la idoneidad del tamaño y la forma, y la comodidad y seguridad de los medios de fijación;
- c) la adecuada resistencia mecánica y estanqueidad al polvo;
- d) la identificación inequívoca;
- e) la facilidad de manipulación;
- f) la fiabilidad de los sistemas de lectura;
- g) la confianza en que el proveedor seguirá suministrando los dosímetros por largo tiempo;
- h) la adaptabilidad a diversas aplicaciones (por ejemplo, la medición de dosis en el cuerpo y en las extremidades);
- i) la disponibilidad de servicios de calibración, y la facilidad de esta operación;
- j) la idoneidad para el procesamiento automático.

# BIBLIOGRAFÍA

- OIEA. GSR Parte 3. (2016).
- OIEA. GSG-7. (2018).
- ICRP Publication 60. (1991).
- EURADOS Report 2021-01. (2021).
- ICRU Report 47 (1992).

