



Ministerio  
**de Industria,  
Energía y Minería**

Dirección Nacional  
**de Aplicaciones de la  
Tecnología Nuclear**

# **Taller Nacional sobre Dosimetría Personal “Actualización sobre Dosimetría de Cristalino”**

Montevideo, 18 de Octubre de 2023

*Daniel Molina Pérez*  
*Laboratorio de Dosimetría Personal Externa*  
*DINATEN*

[daniel.molina@miem.gub.uy](mailto:daniel.molina@miem.gub.uy)

# **Requisitos técnicos y especificaciones dosimétricas para la dosimetría de cristalino**

# CONTENIDO

- Magnitudes y Unidades
- Vigilancia radiológica de la exposición del cristalino
  - ❑ Dosimetría individual
  - ❑ Monitoreo del puesto de trabajo
- Requisitos de funcionamiento y especificaciones para dosímetros de cristalino
- Dosímetros personales para cristalino

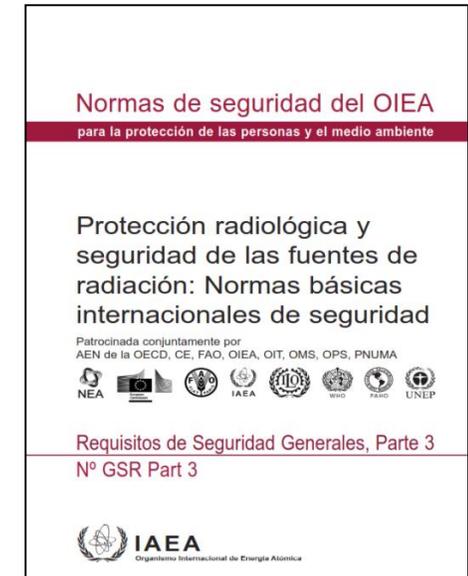
# Magnitudes de Protección Radiológica

Las magnitudes dosimétricas recomendadas con fines de protección radiológica son:

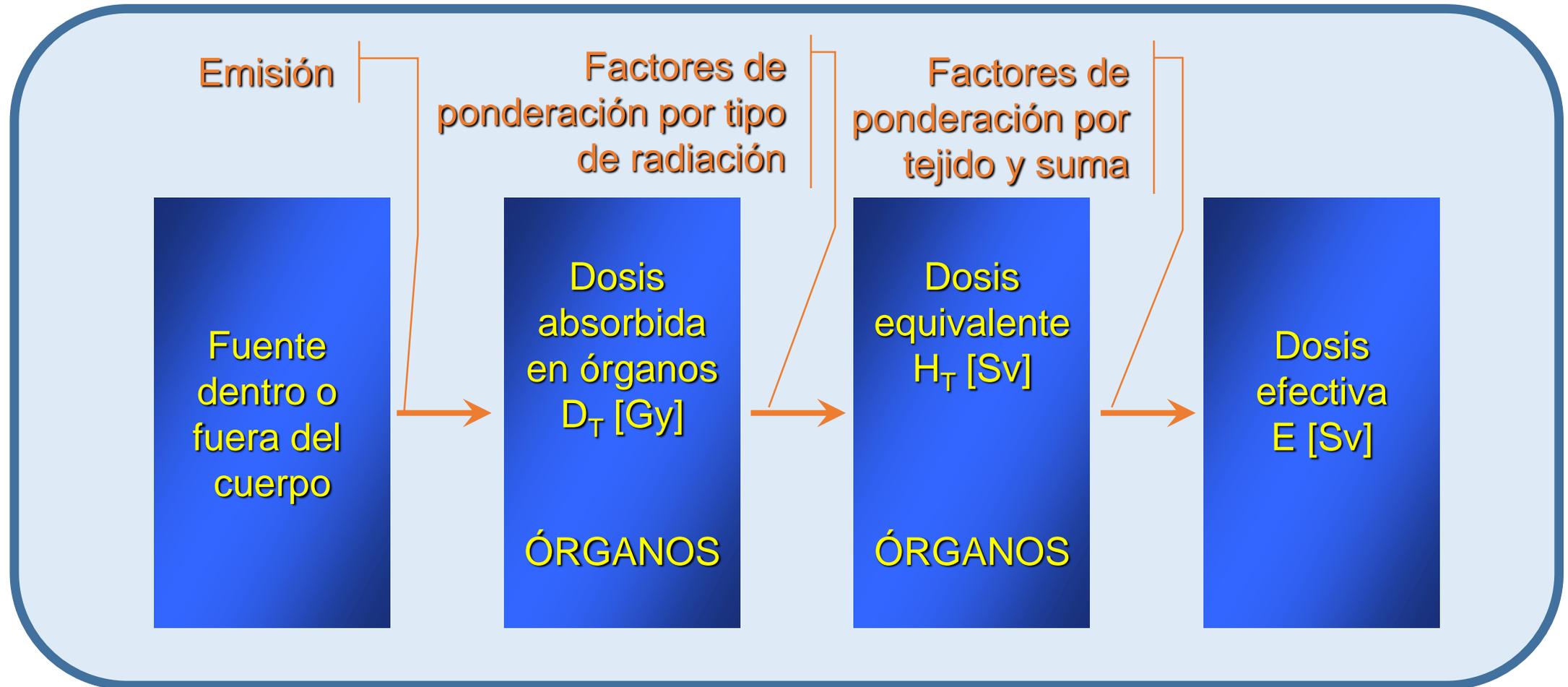
- Dosis equivalente en tejido u órgano ( $H_T$ )
- Dosis efectiva ( $E$ )

Comprenden la suma de las dosis efectivas o equivalentes recibidas debido a la exposición a fuentes de radiación (**NO SOLO EXTERNAS**) en un determinado periodo de tiempo

Los límites de dosis están referidos a estas magnitudes, los cuales se definen para garantizar que la **incidencia de efectos estocásticos a la salud se mantiene por debajo de niveles inaceptables y que son evitadas reacciones tisulares**



# RELACION ENTRE MAGNITUDES EN PR



# Magnitudes de Protección Radiológica

## DOSIS EQUIVALENTE ( $H_T$ )

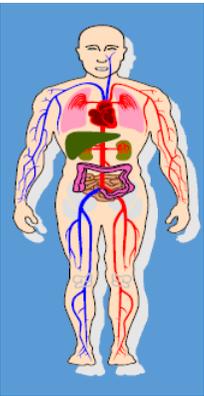
$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R}$$

Unidad:  $J \cdot kg^{-1}$  (Sv)

$W_R$  factor de ponderación de la radiación R  
(**tiene en cuenta la efectividad biológica del tipo de radiación (RBE)**)

$D_{T,R}$  dosis absorbida de R en T

## DOSIS EFECTIVA ( $E$ )



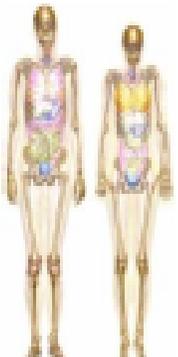
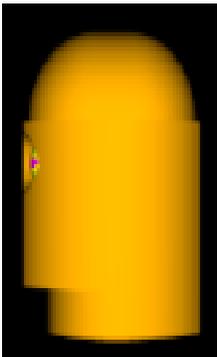
$$E = \sum_T W_T H_T$$

Unidad:  $J \cdot kg^{-1}$  (Sv)

$W_T$  factor de ponderación del tejido T  
(**considera las diferencias en la sensibilidad del tejido y órganos ante las radiaciones**)

# Magnitudes de Protección Radiológica

Definidas mediante simulaciones matemáticas y “maniquíes” que representan el tejido humano y la parte del cuerpo expuesta

	Whole body	Lens of the eye	Local skin
Protection quantities (ICRP 116)	 <p>ICRP reference voxel phantoms:  <math display="block">E_{\text{eff}} = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{T,R}</math></p>	 <p>Stylized eye model; whole lens            (ICRP 116, Annex F):  <math display="block">H_{\text{lens}} = \sum_R W_R D_{\text{lens},R}</math></p>	 <p>Tissue-equivalent cube (10x10x10 cm<sup>3</sup>);            1 cm<sup>2</sup> area at 50 – 100 μm depth            (ICRP 116, Annex G):  <math display="block">H_{\text{local skin}} = \sum_R W_R D_{\text{local skin},R}</math></p>

- Ahora utiliza maniquíes (*phantoms*) computacionales del Hombre referencia y la Mujer de Referencia adultos para el cálculo de las dosis equivalentes en órganos y tejidos.
- Los maniquíes (*phantoms*) están basados en imágenes tomográficas clínicas.

# Limites de Dosis en Protección Radiológica

## Efectos Deterministas vs Estocásticos

- Los límites de dosis se establecen para que **no ocurran efectos deterministas** y reducir la **probabilidad de que aparezcan efectos estocásticos**
- Para las situaciones que puedan producir **efectos deterministas**, se debe considerar la Efectividad Biológica de las Radiaciones (RBE) de los diferentes tipos de radiaciones para considerar efectos deterministas severos
- En este caso la magnitud dosimétrica recomendada es la **Dosis Equivalente** en el órgano e Tejido  $H_T$  (Dosis absorbida  $D_T$  multiplicada por el RBE)

# Limites de Dosis en Protección Radiológica

## Limites de Dosis

La exposición ocupacional de un TOE no debe superar

### Dosis Efectiva:

20 mSv / año      promedio en cinco años consecutivos

50 mSv / año      en un solo año

### Dosis Equivalente:

**20** mSv / año      cristalino

500 mSv/ año      extremidades (piel, manos y pies )

Normas de seguridad del OIEA

para la protección de las personas y el medio ambiente

Protección radiológica y  
seguridad de las fuentes de  
radiación: Normas básicas  
internacionales de seguridad

Patrocinada conjuntamente por  
AEN de la OECD, CE, FAO, OIEA, OIT, OMS, OPS, PNUMA  


Requisitos de Seguridad Generales, Parte 3  
Nº GSR Part 3

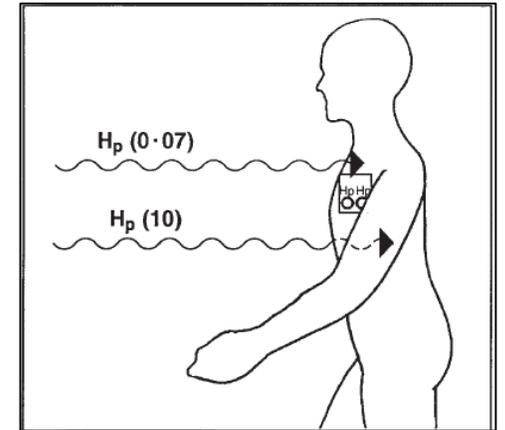
 IAEA  
Organismo Internacional de Energía Atómica

# MAGNITUDES OPERACIONALES

- La dosis equivalente (H) y toda otra magnitud que se derive de ella, **no pueden cuantificarse por medición directa.**
- **ICRU** ha desarrollado magnitudes medibles, llamadas **operacionales**, para su aplicación práctica en PR por irradiación externa.

# MAGNITUDES OPERACIONALES PARA LA DOSIMETRIA DE LAS RADIACIONES

- Permiten una aproximación razonable en la estimación de  $E$  y la dosis equivalente en órganos (no subestimar ni sobrestimar las dosis en la mayoría de los campo de radiación que se presentan en la práctica).
- Definición incorpora el concepto del efecto del cuerpo del receptor (persona), modifica el campo incidente.
- Para considerar el grado de penetración de la radiación, se especifican diferentes profundidades



# MAGNITUDES OPERACIONALES PARA LA DOSIMETRIA DE LAS RADIACIONES

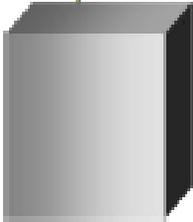
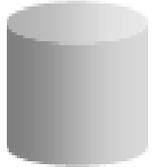
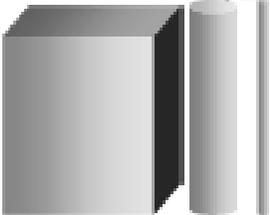
- Utilizan el **Factor de Calidad de la Radiación  $Q(L)$**

Factor que caracteriza la eficiencia biológica de un tipo de radiación, basado en la densidad de ionización a lo largo de las trazas de las partículas cargadas en tejido.

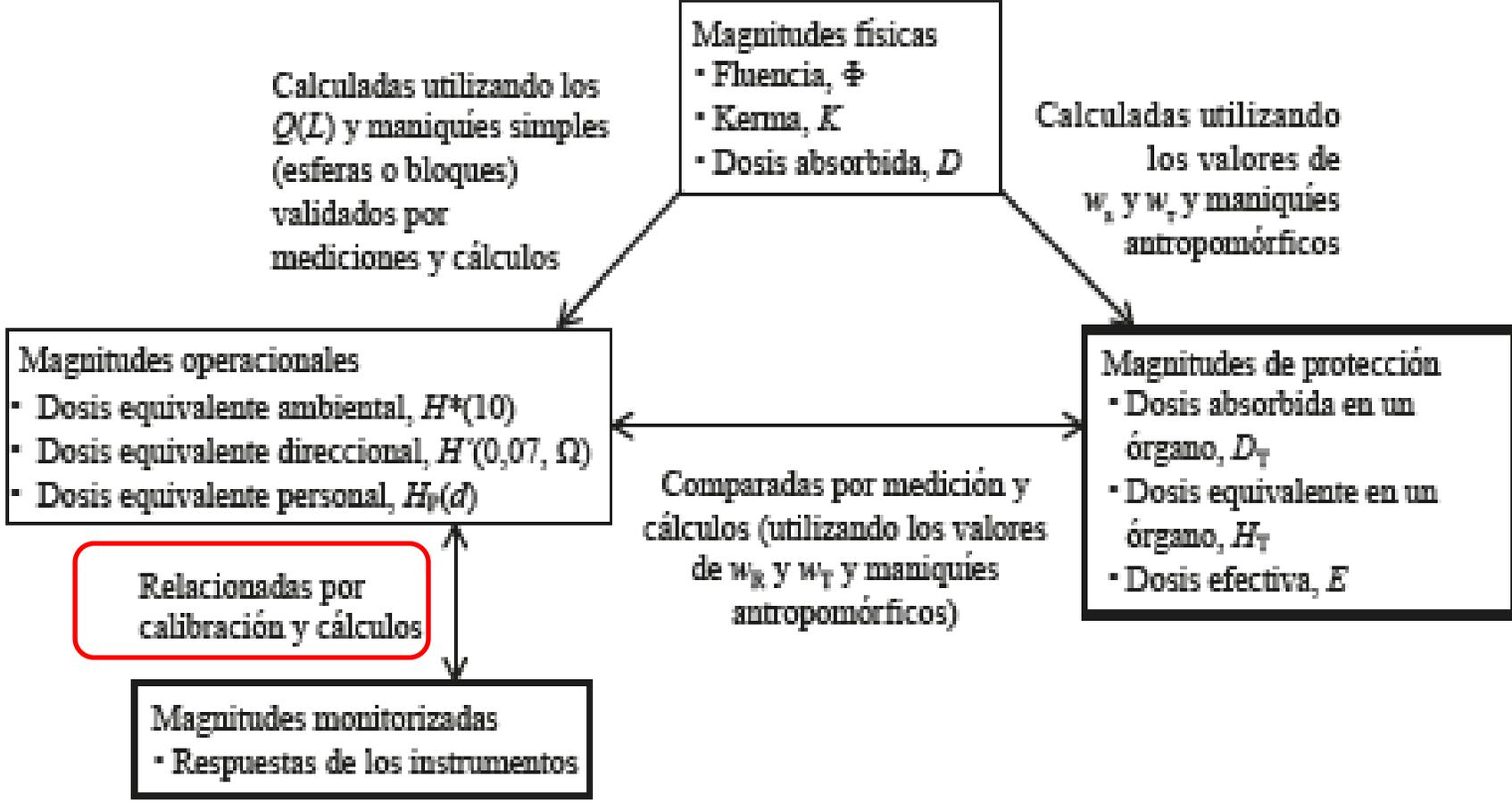
$Q$  se define como función de la transferencia lineal de energía sin restringir,  $L^\infty$  (a menudo representada por  $L$  o LET) de las partículas cargadas en agua:

# MAGNITUDES OPERACIONALES PARA LA DOSIMETRIA DE LAS RADIACIONES

Operational quantities: definition:  $H = Q(L) \cdot D$

Operational quantities for monitoring (ICRU 51)	Area	 <p>ICRU 4-element tissue sphere: <math>\varnothing = 30 \text{ cm}</math>: <math>H^*(10) = Q \cdot D(10)_{\text{sph}}</math></p>	 <p>ICRU 4-element tissue sphere: <math>\varnothing = 30 \text{ cm}</math>: <math>H'(3;\Omega) = Q \cdot D(3;\Omega)_{\text{sph}}</math></p>	 <p>ICRU 4-element tissue sphere: <math>\varnothing = 30 \text{ cm}</math>: <math>H'(0.07;\Omega) = Q \cdot D(0.07;\Omega)_{\text{sph}}</math></p>
	Individual	 <p><math>H_p(10) = Q \cdot D(10)_{\text{person}}</math></p>  <p>For calibration: ICRU 4-element tissue slab: <math>30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3</math>: <math>H_p(10) = Q \cdot D(10)_{\text{slab}}</math></p>	 <p><math>H_p(3) = Q \cdot D(3)_{\text{person}}</math></p>  <p>For calibration: ICRU 4-element cylinder: <math>\varnothing = h = 20 \text{ cm}</math>: <math>H_p(3) = Q \cdot D(3)_{\text{cylinder}}</math></p>	 <p><math>H_p(0.07) = Q \cdot D(0.07)_{\text{pers.}}</math></p>  <p>For calibration: ICRU 4-el. tissue slab, pillar, rod (<math>\varnothing = 73, 19 \text{ mm}</math>): <math>H_p(0.07) = Q \cdot D(0.07)_{\text{slab, pillar, rod}}</math></p>

# Relación entre las Magnitudes



# Magnitud Operacional para Exposición Externa

**Dosis equivalente personal  $H_p(d)$** : dosis equivalente en tejido blando debajo de un punto especificado en el cuerpo, a una profundidad determinada (d)

- Cualquier declaración sobre la Magnitud  $H_p(d)$  debe incluir la especificación de la profundidad de referencia (d)
- La profundidad de referencia se expresa en mm.

Profundidad de Referencia:

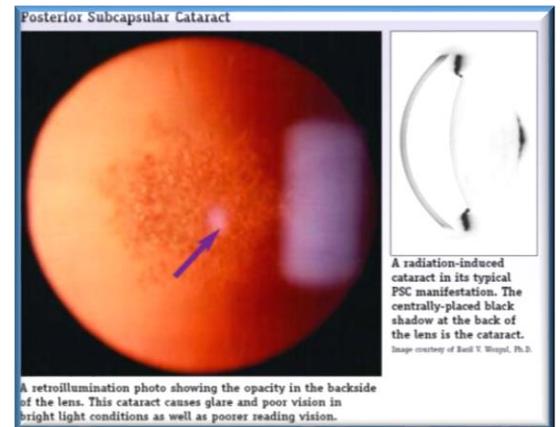
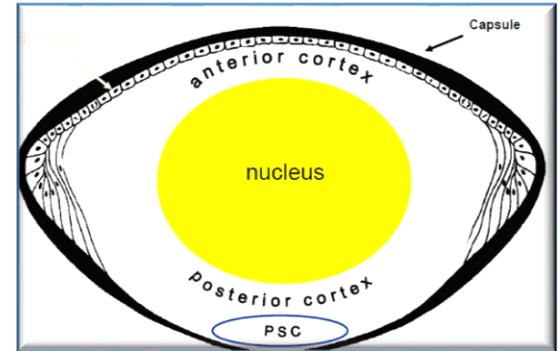
- Para radiación fuertemente penetrante: 10 mm,  
Dosis equivalente personal  $H_p(10)$
- Para radiación poco penetrante: 0.07 mm,  
Dosis equivalente en piel y extremidades,  $H_p(0.07)$

# Magnitud Operacional para Dosimetría de Cristalino

## Dosis equivalente en el cristalino $H_p(3)$

La profundidad de **3 mm** fue definida porque:

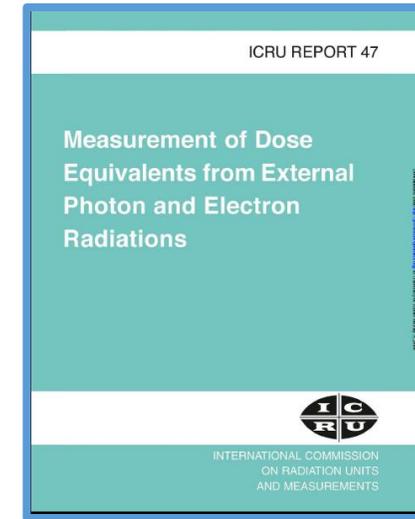
- Se corresponde con la profundidad a la cual se localiza la parte sensible del cristalino.
- Por tanto se asume que la dosis absorbida a una profundidad de 2.5 a 3.5 mm debe proporcionar una estimación razonable de la dosis promedio para la mayoría de las situaciones de exposición (dimensiones y geometrías de irradiación)



# Dosimetría de Cristalino: Hp(3)

- Magnitud Hp(3) es muy poco utilizada

Was defined in ICRU Reports 43 and 47 (ICRU, 1988, 1992) but **no conversion coefficient,  $hp(3)$ , was officially agreed.**



- Hasta hace poco tiempo no se disponía de variedad de dosímetros para medir Hp(3)
- Procedimientos de dosimetría no establecidos apropiadamente

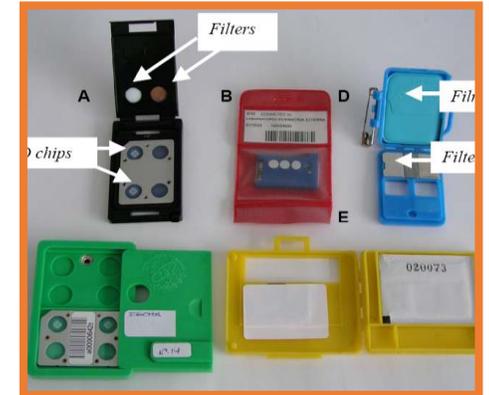
# Vigilancia radiológica individual

Evaluación de las dosis individuales a partir de mediciones realizadas:

- Dispositivos o equipos utilizados sobre el cuerpo de los trabajadores
- Mediciones de sustancias radiactivas dentro o sobre el cuerpo
- Mediciones o análisis de muestras de excretas del organismo.

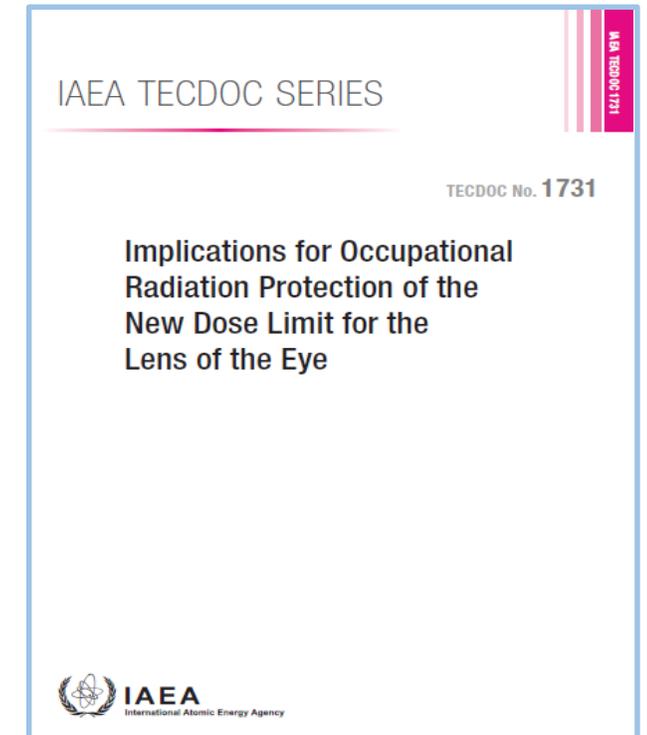


Complementado o alternativa el monitoreo del puesto de trabajo



# Implicaciones del nuevo limite de dosis para Hp(3)

- IAEA GSR Part 3
- European BSS (2013/57 Euratom Directive)
- IAEA Tech doc 1731: "***Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye***"
- IAEA GSG 7: Occupational Radiation Protection Includes monitoring for external radiation (and lens of the eye)
- Report IRPA task group
- **ISO 15382**
- Many research project...

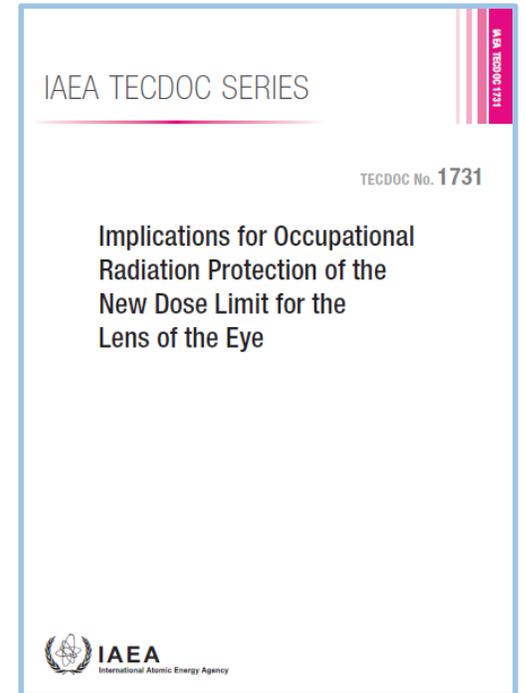


# Vigilancia Radiológica Individual para Hp(3)

La metodología para realizar la dosimetría de cristalino depende principalmente del tipo de radiación a la que se encuentra expuesto el trabajador.

Existen tres factores principales que deben ser tomados en cuenta:

- Energía y ángulo de incidencia de la radiación;
- Geometría del campo de radiación (puede cambiar durante el periodo de monitoreo);
- Uso de medios individuales de protección o blindajes y su correcto empleo.



# Vigilancia radiológica individual del cristalino Hp(3)

✓ El método más exacto para la Dosimetría cristalino es la medición de la magnitud  $H_p(3)$ .

## Condiciones de uso del dosímetro

- El dosímetro dedicado para la medición de  $H_p(3)$  debe ser colocado al nivel de los ojos, lo más próximo que sea posible al ojo y en contacto con la piel.
- En la práctica, las dos opciones más utilizadas  
(a) cerca de la ceja (derecha o izquierda) y  
(b) en la frente entre los dos ojos.



(a) Permite la medición del valor máximo de exposición.



(b) Permite la estimación de la exposición promedio de ambos ojos.

# Vigilancia radiológica individual del cristalino Hp(3)

## Consideraciones prácticas

- ✓ Cuando se utilizan los medios de protección individual (espejuelos plomados o mascarar faciales), el dosímetro debe ser colocado por debajo de la protección para que proporcione información real de la exposición del cristalino.



**Si  $H_p(10)$  y  $H_p(0.07)$  están por debajo de los límites de dosis, el valor de  $H_p(3)$  estará en la gran mayoría de los casos por debajo del límite de dosis para el cristalino:**

**Limite de dosis ha sido reducido en un factor de 7 (de 150 mSv a 20 mSv).**



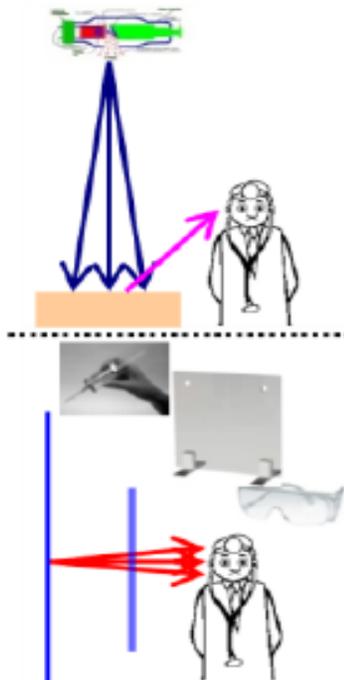
# Vigilancia radiológica individual del cristalino Hp(3)

## Consideraciones prácticas

- ✓ En caso de no disponer de este tipo de dosímetros,  $Hp(3)$ :
  - Se puede aceptar la estimación a partir de dosímetros calibrados en **términos de  $Hp(10)$  o  $Hp(0.07)$  y colocados en el cuerpo, las extremidades o cerca de los ojos.**
  - La aplicación de estos métodos **requieren conocer las características del campo de radiaciones en el puesto de trabajo (energía y ángulo).**
  - La incertidumbre en la dosis estimada son mayores

# Vigilancia radiológica individual del cristalino Hp(3)

Cuál magnitud es apropiada?



Radiation field	$H_p(0.07)_{\text{rod}} / H_{\text{lens}}$	$H_p(0.07)_{\text{slab}} / H_{\text{lens}}$	$H_p(3)_{\text{slab}} / H_{\text{lens}}$	$H_p(10)_{\text{slab}} / H_{\text{lens}}$
X-ray mean $E < 30$ keV	0.9 – 5	1 – 5	$\approx 1$	0.01 – 0.9
X-ray mean $E > 30$ keV	0.8 – 0.9	$\approx 1$	$\approx 1$	0.9 – 1.2
Beta max. $E < 0.6$ MeV and X-rays	1 – 100	1 – 100	$\approx 1$	see above
Beta max. $E \approx 1$ MeV and X-rays	1 – 500	1 – 500	$\approx 1$	$2 \times 10^{-4} - 1$
Beta max. $E > 1.5$ MeV and X-rays	1 – 60	1 – 60	$\approx 1$	$2 \times 10^{-4} - 1$

R. Behrens and G. Dietze:  
*Phys. Med. Biol.* 55 (2010) 4047-4062  
 and *Phys. Med. Biol.* 56 (2011) 511

$H_p(0.07)_{\text{slab}}$  is ONLY  
 adequate for  
 photon radiation.

$H_p(3)$  is  
 NECESSARY for  
 beta radiation.

$H_p(10)$  is NOT  
 adequate for  
 $E_{\text{ph}} < 40 \text{ keV}$  &  $\beta$

# Vigilancia radiológica individual del cristalino Hp(3)

## Consideraciones prácticas

- ✓ Frecuentemente, en la **práctica no es posible utilizar el dosímetro de cristalino en la posición ideal** (cerca de los ojos y/o detrás de los medios de protección, por ejemplo, espejuelos plomados).
- ✓ En este caso **deben aplicarse factores de corrección a los resultados.**
- ✓ La **corrección depende de la energía de la radiación**, la misma debe ser ajustada según la calidad de la radiación, lo que significa que **el campo de radiaciones a que está expuesto el trabajador debe conocerse.**
- ✓ Estos factores, **normalmente deben ser determinados a través de mediciones y muy posiblemente combinados con simulaciones matemáticas**

# Vigilancia radiológica individual del cristalino Hp(3)

TABLE 5. GUIDANCE ON THE CHOICE OF DOSIMETERS NECESSARY TO MONITOR THE DOSE TO THE LENS OF THE EYE IN MIXED RADIATION FIELDS<sup>8</sup> REGARDING THE TYPE AND POSITION OF DOSIMETERS TABLES 2 TO 4 APPLY.

Radiation in the field			Necessary types of dosimeters
Neutron	Photon	Beta above 0.7 MeV	
x <sup>1</sup>			One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons
	x		One $H_p(0.07)$ - and/or one $H_p(10)$ -dosimeter for photons
		x	One $H_p(3)$ -dosimeter for beta radiation
x	x		One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons and one $H_p(0.07)$ - and/or one $H_p(10)$ -dosimeter for photons
x <sup>1</sup>		x	One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons and one $H_p(3)$ -dosimeter for beta radiation
	x	x	One $H_p(3)$ -dosimeter for photons and beta radiation
x	x	x	One $H_p(10)$ -dosimeter for neutrons and one $H_p(3)$ -dosimeter for photons and beta radiation

<sup>1</sup> It is noted that neutron radiation is almost always accompanied by photon radiation but the possibility of neutron radiation alone is listed here for the sake of completeness.

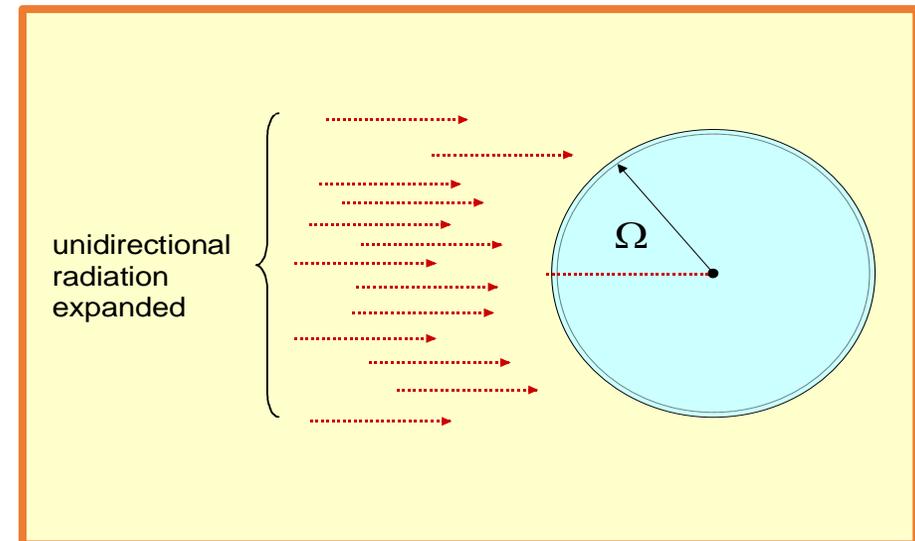
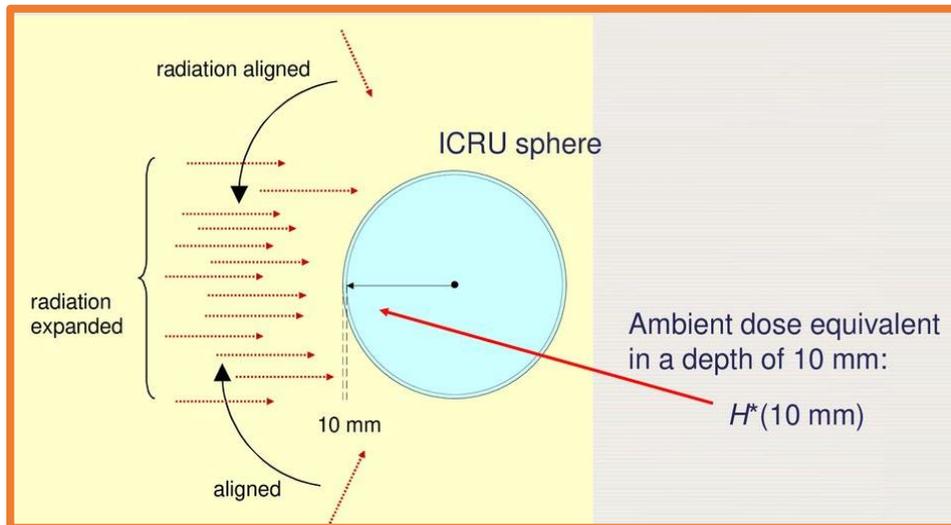
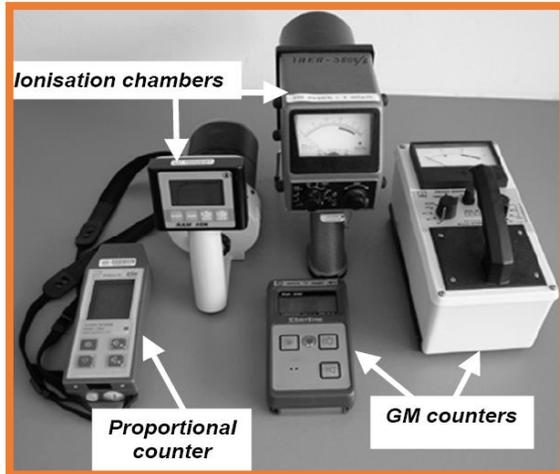
# Monitoreo del puesto de trabajo para Hp(3)

Mediciones realizadas en el ambiente de trabajo con instrumentos o equipos apropiados

## Magnitud operacional

- ❑ Ambient dose equivalent  $H^*(d)$
- ❑ Directional dose equivalent  $H'(d, \Omega)$

Profundidad Referencia:  $d=10$ ,  $d=0.07$  y  $d=3$



# Monitoreo del puesto de trabajo para Hp(3)

- Deberá ser suficiente para permitir:
  - evaluación de las condiciones radiológicas en todos los puestos de trabajo,
  - evaluación de la exposición en las ZC y ZS,
  - examen de la clasificación de las zonas



- Como realizar las mediciones:

***When measuring  $H^*(d)$  or  $H'(d, \Omega)$ , the radiation field should be uniform over the dimensions of the instrument and the instrument should have the appropriate directional response***



## Monitoreo del puesto de trabajo para Hp(3)

- Actualmente no se dispone de **normas** para los equipos de monitoreo de área medidores de la dosis equivalente direccional a una profundidad de 3,  $H'(3)$ .
- Tampoco se dispone de monitores de área calibrados en términos de  $H'(3)$ .
- Como estimar las dosis ocupacionales individuales a partir de los resultados del monitoreo del puesto de trabajo



# Requisitos de funcionamiento para Dosímetros de Hp(3)

- Idealmente para lograr mediciones adecuadas de Hp(3) los dosímetros personales deber ser probados (pruebas tipo) y calibrados acorde a los estándares internacionales.

## IEC 62387:2012



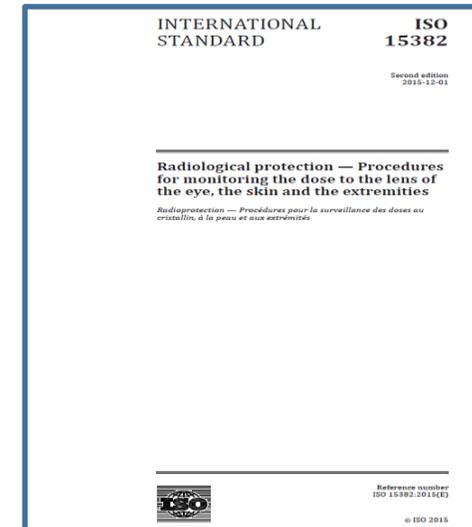
Hp(10), Hp(0.07) y **Hp(3)**  
Fotones y Beta

## IEC 12794:2012



Hp(0.07)  
Fotones y Beta

## ISO 15382: 2018

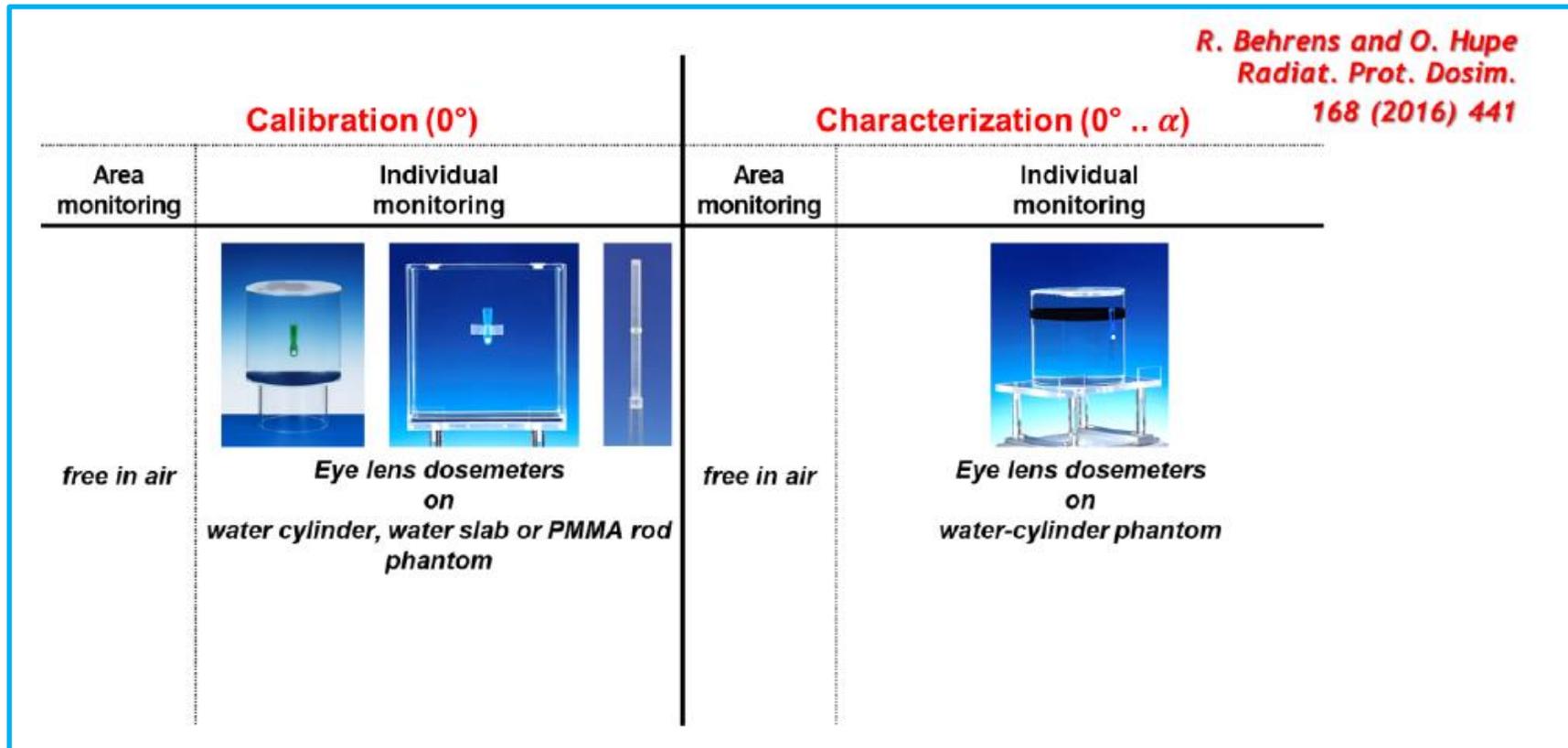


Hp(0.07) y **Hp(3)**  
Fotones y Beta

# Requisitos de funcionamiento para Dosímetros de Hp(3)

## Pruebas de funcionamiento (Type Test) y Calibración

Las pruebas tipo de los dosímetros para Hp(3) deben efectuarse con un **maniquí apropiado que simule la retrodispersión y atenuación producidas por el cuerpo.**

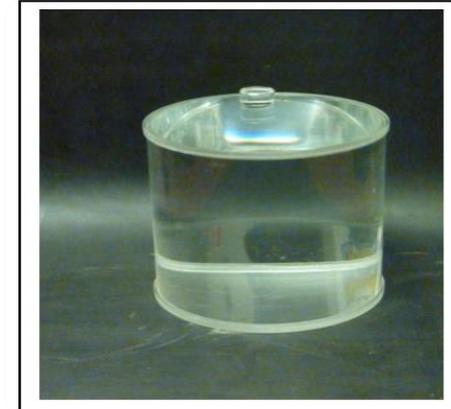


Si el dosímetro funciona adecuadamente en el maniquí,

puede suponerse que lo hará también en el cuerpo de una persona.

# Calibración y Caracterización de Dosímetros para Hp(3)

- Pruebas tipo y calibración del sistema deben realizarse utilizando el **simulador cilíndrico**.
- Sin embargo, si la calibración se realiza utilizando incidencia normal (situación práctica más común), también es apropiado el simulador de tórax (*slab phantom*) empleado para la calibración en *Hp(10)*.
- En el caso de las pruebas tipo, especialmente aquellas que se realizan con ángulos de incidencia superiores a  $30^\circ$ , deben ser realizadas utilizando el simulador cilíndrico.



## Diseño de Dosímetros para $H_p(3)$

- Diseño ideal del dosímetro: **el detector y su soporte reproducen exactamente las condiciones en las que está definida la magnitud operacional que se quiere medir  $H_p(3)$ .**
  - ✓ Para la medición de  $H_p(3)$  o  $H'(3)$ , **el detector debería estar cubierto por una capa de material tejido equivalente de 3 mm de espesor.**
  - ✓ La mejor opción es que la parte frontal del dosímetro tenga forma de semiesfera de 3 mm de radio y la parte posterior posea un espesor de material tejido equivalente suficiente para reproducir la radiación retrodispersada por el cuerpo humano.
- Importante es que la composición del detector y/o la forma del dosímetro, incluyendo las caras frontal y posterior, **estén diseñadas para cumplir el criterio para la respuesta energética y angular.**

# Dosímetros personales para Hp(3)



Dosímetro EYE-DTM:  
Respuesta energética fotones  
(30 keV-1.33 MeV): <20%.  
Rango de dosis: 10  $\mu$ Sv hasta 10 Sv.  
Respuesta angular: 20% 0 y 80°

## Harshaw

### “Chipstrates” y “EXT-RADTM”:

Funda de PTFE de 3 mm y 1.5 mm de espesor.  
Rango de dosis: 0.15 mSv hasta 10 Sv  
Rango de energía fotones: 16 - 662 keV  
Respuesta angular: hasta 45°.



## Dosímetros personales para Hp(3)



**Dosímetro DOSIRIS:** cinta cabecera rígida con alojamiento para el TLD cubierto por ambos lados por una capa de polipropileno de 3 mm de espesor.

Rango de dosis: 100  $\mu$ Sv hasta 50 Sv (partículas beta y fotones)

Rango de energías: fotones entre 20 keV y 1.3 MeV,  
beta desde 700 keV.



**Dosímetros Landauer:** adaptable para diversas formas de uso.

Constituido por un TLD dentro de una capsula de polietileno y una armadura de plástico flexible que permite fijarlo en diferentes soportes.

Calibrados para la medición de  $Hp(3)$  y pueden medir fotones y beta.

Rango de dosis: 0.1 mSv a 10 Sv (partículas beta y fotones),

Respuesta energética y angular: fotones  $\pm 60^\circ$  desde 24 keV a 6 MeV

Beta  $\pm 45^\circ$  ; 0.8 MeV ( $E_{mean}$ )

## Dosímetros personales para Hp(3)

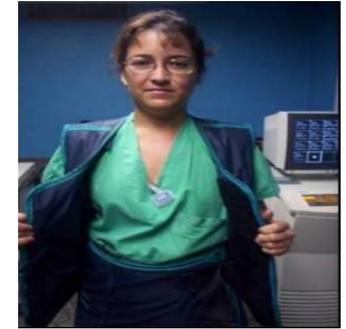


Recientemente el desarrollo de los productos para soportar la dosimetría del cristalino ha evolucionado de dispositivos para investigación a dispositivos más comerciales.

El modelo que se muestra a la izquierda es un desarrollo muy interesante, en el cual el dosímetro de cristalino está integrado a los espejuelos protectores.

# Doble dosimetría

- Basada en el uso de dos (2) dosímetros sobre el cuerpo del trabajador:
  - Uno al nivel del pecho **debajo del delantal**
  - Otro en el cuello por **encima del delantal**
- El dosímetro colocado al nivel del cuello, por encima del delantal, puede utilizarse para estimar la dosis al cristalino, **si se aplica el factor de corrección apropiado**:
- Este factor puede variar debido a la caracterización del campo de radiaciones en el punto de medición donde se coloca el dosímetro con relación a la cabeza del usuario:
  - Se han publicado valores desde 0.4 a 1.4**
- Es importante considerar cuestiones prácticas propias de la vigilancia radiológica individual:
  - Desconocimiento de la posición exacta de colocación del dosímetro
  - Uso irregular o errático de dosímetros.



- ✓ **El dosímetro oficial va por debajo del delantal.**
- ✓ **Si es utilizado por debajo de la ropa protectora, se subestima fuertemente la dosis en las partes no protegidas (extremidades y cabeza) y **por tanto no debe utilizarse como un indicador del nivel de tales dosis.****

## RESUMEN

- ✓ El método más exacto para la dosimetría cristalino es la medición de la magnitud  $H_p(3)$ .
- ✓ El dosímetro para la medición de  $H_p(3)$  debe ser colocado al nivel de los ojos, lo más próximo que sea posible al ojo y en contacto con la piel.
- ✓ Colocado en la posición incorrecta puede provocar una subestimación considerable de la dosis (hasta 45%).
- ✓ Pruebas tipo y calibración del sistema deben realizarse utilizando el simulador apropiado.
- ✓ Si las características del campo de radiaciones (puesto de trabajo), son bien conocidas,  $H_p(3)$  puede ser estimada utilizando dosímetros calibrados para  $H_p(0.07)$  y  $H_p(10)$



Ministerio  
**de Industria,  
Energía y Minería**

Dirección Nacional  
**de Aplicaciones de la  
Tecnología Nuclear**

# **Taller Nacional sobre Dosimetría Personal “Actualización sobre Dosimetría de Cristalino”**

Montevideo, 18 de Octubre de 2023

*Daniel Molina Pérez*

*Laboratorio de Dosimetría Personal Externa*

*DINATEN*

*[Daniel.molina@miem.gub.uy](mailto:Daniel.molina@miem.gub.uy)*