

CAPÍTULO 2

Magnitudes y unidades radiológicas

Gustavo Sánchez

Convención sobre términos

Magnitud: Cuando hablamos de Magnitud nos referimos a la **definición** de la misma; por ejemplo, la Dosis Absorbida en un punto es la derivada de la energía absorbida en ese punto. **Símbolo** es la abreviatura de la magnitud, por ejemplo, el símbolo de Dosis Absorbida en un punto es Da.

Unidad: Es la unidad de medida de esta magnitud. Por ejemplo, la unidad de Dosis Absorbida es el Gray, cuya abreviatura es Gy. Las unidades de las magnitudes radiológicas se derivan de las unidades de las magnitudes a partir de las que se definen. Por ejemplo, la unidad de Dosis Absorbida (energía / masa) es Joule (unidad de energía) sobre kilogramo (unidad de masa). La unidad de dosis absorbida Gray equivale a 1 Joule/kg.

“Tasa de” Es la variación de la magnitud por unidad de tiempo. Su símbolo es el mismo de la magnitud con un punto encima del mismo. Por ejemplo la tasa de dosis absorbida se expresa como $\dot{D}$ a y su unidad será “Gray/h” o sea Joule/(kg.hora)

Tabla 2.1. Múltiplos y submúltiplos.

SUBMÚLTIPLOS	Símbolo	Valor
femto	f	10^{-15}
pico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
Micro	μ	10^{-6}
Mili	m	10^{-3}
MÚLTIPLOS		
Kilo	K	10^3
Mega	M	10^6
Giga	G	10^9
Tera	T	10^{12}

Fuente: elaboración propia.

Magnitudes específicas para protección radiológica

Magnitudes básicas

Las magnitudes básicas se utilizan para

- estimar los riesgos de efectos estocásticos de los individuos y grupos de individuos expuestos a la radiación,
- a partir de lo anterior, poder establecer medidas de protección radiológica (por ejemplo, establecer Límites de Dosis) (ICRP, 2007),
- predecir la ocurrencia o no de efectos deterministas y su gravedad.

Dosis absorbida en un punto

Energía por unidad de masa absorbida en un punto de cualquier medio material. Se define como el cociente entre $d\epsilon$ y dm , donde $d\epsilon$ es la energía impartida media por la radiación ionizante a una masa dm . Símbolo: D_a ; Unidad Gray. $1\text{Gy}=1\text{Joule/kg}$. Es proporcional a la Tasa de Fluencia de energía en ese punto, siendo el factor de proporcionalidad el coeficiente másico de absorción μ_{en}/ρ el que a su vez depende de la energía de la radiación y del número atómico del material (Ejemplos: dosis en un punto de la piel del paciente, dosis a una determinada profundidad de agua,).

Dosis absorbida media en un órgano o tejido

Energía total recibida por un órgano o tejido, promediada en toda la masa de un órgano. A diferencia de D_a , que se define para un punto en cualquier medio material, la Dosis Absorbida Media en un órgano se define para un órgano o tejido. Es el cociente entre ϵ_T y m_T , donde ϵ_T es la energía total impartida a un tejido u órgano de masa m_T . Símbolo D_T . Unidad Gray. $1\text{Gy}=1\text{Joule/kg}$. Nótese que la unidad es la misma que para D_a , pero la definición es distinta.

Dosis equivalente en un órgano

Tiene en cuenta la dosis que entrega al órgano o tejido cada tipo de radiación ponderada por un factor que tiene en cuenta la “calidad de la radiación” entendiendo por calidad a la capacidad de producir daño biológico, en particular la capacidad de producir lesiones complejas y por lo tanto difíciles de reparar. El riesgo de que se produzcan efectos estocásticos en un órgano o tejido es proporcional a la Dosis Equivalente en ese órgano o tejido. Se define como $H_T = \sum D_{TR} W_R$, donde D_{TR} es la dosis absorbida media en un órgano o tejido “T” debido a la radiación “R” y W_R es el Factor de Ponderación de la Radiación “R”. Los valores de W_R se muestran en la Tabla 2. Se puede interpretar a W_R como un factor que indica cuánto más “dañina” es un tipo de radiación con respecto a otra que se tome arbitrariamente como referencia, en este caso la radiación fotónica X o γ ; Símbolo H_T . Unidad Sievert $1\text{Sv}=1\text{Joule/kg}$. Nótese que sigue teniendo unidad de energía/masa, pero cambia el nombre.

Dosis efectiva

Es la más abarcativa de la Magnitudes Básicas, ya que tiene en cuenta la Dosis Absorbida, el Tipo de Radiación y la sensibilidad relativa de los órganos o tejidos expuestos. El riesgo de efectos estocásticos para el individuo es proporcional a la Dosis Efectiva. Se define como $E = \sum H_T W_T$, donde H_T es la Dosis Equivalente en cada órgano o tejido expuesto a la radiación y W_T es el denominado “Factor de Ponderación del Tejido”. Está relacionado con la radiosensibilidad de los tejidos: los más radiosensibles tienen W_T más alto y viceversa. Se puede interpretar como la fracción del riesgo total que le corresponde a ese órgano o tejido, ya que $\sum H_T W_T = 1$. Los valores de W_T se muestran en la Tabla 3. Su símbolo es E y su Unidad Sievert $1\text{Sv}=1\text{Joule/kg}$, al igual que la dosis equivalente en un órgano. Pero la Dosis Efectiva expresa el riesgo de efectos estocásticos al que está expuesto EL INDIVIDUO, no ya el riesgo para un órgano determinado.

Tabla 2.2. Factores de Ponderación de la Radiación.

Tipo de radiación	W_R
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, Fragmentos de fisión, iones pesados	20
Neutrones	Entre 2.5 y 20 según la energía

Fuente: elaboración propia basado en ICRP (2007)

Tabla 2.3. Factores de ponderación de los Tejidos (W_T).

Tejido	W_T	$\sum W_T$
Medula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos (*)	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivales, piel	0,01	0,04
TOTAL		1

Nota. (*) Resto de los Tejidos: adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix. Fuente: elaboración propia basado en ICRP (2007)

Nótese que si la exposición a la radiación es uniforme en todo el cuerpo, todos los órganos recibirán la misma HT, por lo que la expresión WT queda $E = HT \sum WT$ ya que HT sale como factor común. Pero como $\sum WT = 1$ resulta que $E = HT$.

Dosis efectiva comprometida

El individuo que incorporó material radiactivo, ya sea por ingestión, inhalación o a través de la piel, seguirá recibiendo dosis después de ocurrido el evento que originó la incorporación. La dosis total integrada a lo largo de un determinado período de tiempo depende de varios factores, como la actividad incorporada, la vida media del nucleido, su forma física, la vía de incorporación, el metabolismo, el comportamiento radioquímico, etc.

Conceptualmente, la Dosis Efectiva Comprometida $E(\tau)$ se define como la Suma de los productos de las dosis equivalentes comprometidas en órganos y tejidos y de los factores de ponderación de tejido correspondientes (W_T): $E(\tau) = \sum H_T(\tau) W_T$ donde τ es el tiempo de integración, en años, después de la incorporación. La Dosis Equivalente Comprometida $H_T(\tau)$ es la integral en el tiempo de la tasa de dosis equivalente en un órgano o tejido particular a consecuencia de la incorporación de material radiactivo en el cuerpo, donde τ es el tiempo de integración expresado en años. El periodo de compromiso se toma como 50 años para adultos y hasta la edad de 70 años para niños.

Como el Riesgo de Efectos Estocásticos por Irradiación es proporcional a la Dosis Efectiva E, para incorporación es proporcional a la Dosis Efectiva Comprometida $E(\tau)$.

Dosis efectiva colectiva

En protección radiológica se deben tomar medidas para limitar los riesgos individuales al que está expuesta cada persona por el hecho de recibir una dosis de radiación. El riesgo individual es proporcional a la Dosis Efectiva E. Pero también algunas decisiones se deben tomar teniendo en cuenta el riesgo colectivo; el riesgo de efectos estocásticos para una población, es decir el número de personas que podrían desarrollarlos, dependerá tanto de las dosis individuales como de la cantidad de individuos expuestos. El riesgo colectivo será proporcional a una magnitud que incluya ambas variables: la Dosis Colectiva.

La dosis efectiva colectiva debida a valores de dosis efectivas individuales entre E_1 y E_2 , debidas a una fuente especificada en un periodo de tiempo ΔT se define como

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE$$

Para aclarar el concepto: asumiendo que el riesgo de muerte atribuible a la radiación para un rango de edades de entre 0 y 65 años es $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ si una persona recibe una dosis de 1 mSv su riesgo individual será $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1} \times 1 \times 10^{-3} \text{ Sv} = 4 \times 10^{-5}$ (4 en cien mil). Ahora, si esa misma dosis la reciben 1000 personas, el riesgo de que alguna de esas mil personas muera por cáncer inducido por la radiación es el riesgo individual multiplicado por el número de personas: $4 \times 10^{-5} \times 1 \times 10^3 = 4 \times 10^{-2}$ (o sea: existe una esperanza matemática igual a “1” de que 4 personas de ese grupo mueran de cáncer radioducido, aunque es imposible identificar a esos individuos). En

este ejemplo E_1 y E_2 son iguales (1mSv) por lo que la integral queda la expresión de S queda $S = E \times N$ y el riesgo es directamente proporcional a S .

Las magnitudes básicas son muy importantes, pero tienen un grave problema: **no se pueden medir** (salvo la dosis absorbida en un punto). Sólo se pueden estimar a partir de **magnitudes operacionales**, las que sí se pueden medir.

Magnitudes operacionales

Dosis equivalente individual

(O Dosis Equivalente Personal) es la que se utiliza para vigilancia radiológica ocupacional de la exposición externa (dosimetría personal). Es la que miden los dosímetros personales, que, bien utilizados, permiten ESTIMAR la Dosis Efectiva o la Dosis Equivalente (según corresponda) con una razonable exactitud. A partir de una evaluación periódica, habitualmente mensual, se pueden evaluar las condiciones de trabajo y eventualmente tomar medidas correctivas antes de que la dosis acumulada sea muy alta. Se usa también para evaluar el cumplimiento de los límites y restricciones de dosis, siempre hablando de la exposición a la radiación externa. La dosis equivalente personal, $H_p(d)$ se define en el tejido (blando) ICRU a una profundidad apropiada, d , debajo de un punto especificado en el cuerpo humano. Habitualmente el punto especificado es aquel donde es usado el dosímetro individual. Para la evaluación de la dosis efectiva, se elige $H_p(10)$ a una profundidad $d = 10$ mm. Para la evaluación de la dosis a la piel y a las manos/ pies se usa el equivalente de dosis personal, $H_p(0,07)$, a una profundidad $d = 0,07$ mm. No ha sido definida ninguna magnitud operacional para proveer una evaluación de la dosis equivalente o la dosis efectiva para la dosimetría interna.

Dosis equivalente ambiental $h^*(10)$

Se utiliza para medir la tasa de dosis en los lugares de trabajo y sus alrededores (monitoreo áreas). Permite tomar medidas para reducir la exposición a la radiación externa durante y aun antes de comenzar a trabajar para, por ejemplo, evaluar la eficacia de los blindajes. Por eso decimos que son magnitudes PROSPECTIVAS. Esta dosis se realiza utilizando algún equipo de medición calibrado (Geiger Müller, Cámaras de Ionización, Contadores proporcionales, etc.). Se define como la dosis en un punto de un campo de radiación que se produciría por el correspondiente campo alineado y expandido en la esfera ICRU a una profundidad de 10 mm y sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado. La unidad del equivalente de dosis equivalente ambiental es el J kg⁻¹ y su nombre especial es sievert (Sv).

Otras magnitudes de utilidad en protección radiológica

Exposición: es una magnitud sólo definida para campos de radiación X o γ . El uso de esta magnitud está desaconsejado por el ICRP y el ICRU. La mencionamos porque hay equipos aún en uso calibrados en términos de tasa de exposición.

Kerma: en protección radiológica, principalmente para la protección radiológica del paciente, se emplea para caracterizar la intensidad de un campo de radiación en un punto del espacio. Su definición es muy parecida a la de Dosis Absorbida: *“Es el cociente entre la suma de las energías cinéticas, E_{tr} de todas las partículas cargadas liberadas por las partículas no cargadas en una masa dm de materia y la masa dm de esa materia”*.

Flujo de energía: es el cociente de dR por dt , donde dR es la variación de la energía radiante en un tiempo dt

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt}$$

unidad: $J \cdot s^{-1} = W$

En una fuente radiactiva el Flujo de Energía depende de la Actividad de la fuente (desintegraciones por unidad de tiempo) y del espectro de energía de la radiación. Es básicamente la “potencia” de la fuente. En un generador de Rx dependerá de la corriente del tubo, la diferencia de potencial y otros factores que determinarán el espectro de energía del haz.

Tasa de fluencia de energía: es la variación de la energía incidente sobre un elemento diferencial de área por unidad de tiempo. Es directamente proporcional al flujo de energía (la “potencia” de la fuente) e inversamente proporcional, para una emisión isotrópica, de la superficie de una esfera centrada en la fuente. Esta área a su vez es πr^2 , siendo r el radio de la esfera, es decir: la distancia entre la fuente y el punto donde estamos definiendo la tasa de fluencia.

$$= \frac{dR}{dt} \frac{dR}{dA}$$

a unidad es $[J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$, o $W \cdot m^{-2}$

Coefficiente másico de absorción μ_{en}/ρ : es el factor de proporcionalidad entre la tasa de fluencia en un punto y la energía que será absorbida por un material ubicado en ese punto. Es función del número atómico del material y de la energía de la radiación. Usaremos este coeficiente cuando tratemos la dosimetría de fuentes gamma.

Coefficiente másico de atenuación μ/ρ : es el factor de proporcionalidad entre la tasa de fluencia en un punto y la energía TOTAL que la radiación pierde al interactuar con un material ubicado en ese punto, sumando absorción, dispersión y energía de la radiación de frenado. Es función del número atómico del material y de la energía de la radiación. Volveremos sobre este coeficiente en el Capítulo de Blindajes.

Magnitudes para estimación de dosis al paciente

Son magnitudes que PUEDEN SER MEDIDAS mediante instrumentos o dosímetros colocados sobre el paciente, dentro del equipo (por ejemplo, Arco en C en intervencionismo) o en el ambiente, que permiten estimar la dosis que recibe el paciente. Esto permitirá evaluar si nuestro equipo y/o nuestras técnicas de trabajo son las más apropiadas para cada técnica. El objeto es OPTIMIZAR los valores de dosis y mantenerlos en valores similares a los VALORES DE REFERENCIA (tema que desarrollaremos en el Capítulo 4).

Hay tres formas de medir o estimar la dosis que recibe el paciente:

- Colocando dosímetros directamente sobre el paciente; esto se hace sólo en investigaciones de laboratorio o cuando se calibran dosímetros.
- Mediante medidores, que pueden estar colocados en el propio equipo o ser externos; la dosis que se entrega al paciente se calcula en forma manual o automática a partir de estas mediciones.
- Mediante la medición de parámetros propios de la técnica (kV, mA, tiempo, frames por segundo, distancias, tamaños de campo, etc). En los equipos actuales estos parámetros y las dosis estimadas se registran en formato digital (DICOM) para cada estudio.

Describiremos estos sistemas en el Capítulo 9, dedicado a Radiología.

Referencias

ICRP (2007). *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación 103. [Traducción oficial al español de la Sociedad Española de Protección Radiológica]