

**TEMA 3**  
**MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS**  
*Miguel Alcaraz Baños*

**Objetivos generales.**

1. Definir el Roentgenio.
2. Definir el C/Kg como unidad de exposición en el Sistema Internacional.
3. Explicar el concepto de "tasa" aplicado a las magnitudes radiológicas.
4. Definir el rad.
5. Introducir el rad y el Gray como unidades de dosis de absorción.
6. Establecer la relación entre el rad y el Gray.
7. Establecer la relación entre la dosis absorbida con la exposición de un haz de fotones.
8. Describir el interés de utilización de la dosis equivalente.
9. Definir el rem.
10. Establecer la relación entre Sievert y rem.
11. Explicar el significado del factor de calidad.
12. Explicar el concepto de "curvas de isodosis".
13. Distinguir entre dosis superficial y dosis profunda en el profesionalmente expuesto.
14. Describir cualitativamente qué se entiende por dosis efectiva.
15. Diferenciar entre dosis de entrada y dosis en órganos.
16. Explicar qué se entiende por dosis integral (energía total absorbida).

# TEMA 3

## MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS

*Miguel Alcaraz Baños*

### 3.1.- INTRODUCCIÓN.

Entre las propiedades de las radiaciones ionizantes no se encuentran cualidades físicas que las hagan apreciables de forma directa mediante los sentidos humanos: no pueden verse, ni se huelen, ni se oyen ni se tocan, ni se sienten. Por ello podría pensarse, equivocadamente, que no existen o que no pueden provocar ningún efecto biológico. Sin embargo, sí es posible reconocer su existencia por los efectos que ocasionan, por su capacidad de ionizar la materia y de ser absorbidos por la misma.

Precisamente la necesidad de su cuantificación está derivada de la producción de una serie de efectos lesivos sobre los organismos vivos. Hace mucho tiempo que se sabe que las dosis altas de radiación ionizante pueden causar lesiones en los tejidos humanos. Ya a los seis meses del descubrimiento de los rayos X por Roentgen en 1895, se describieron los primeros efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.

El análisis de síntomas patológicos de un conjunto de radiólogos permitió establecer en 1922 que la incidencia de cáncer era en ellos significativamente más alta respecto a otros médicos, circunstancia que reafirmó el efecto lesivo de las radiaciones ionizantes y la necesidad de establecer normas específicas de radioprotección, con la introducción de magnitudes radiológicas que permitiesen utilizar estas radiaciones de una forma cuantitativa.

La normativa internacional que inicia la normalización de las magnitudes y unidades en el campo de la Metrología comenzó en 1875, cuando 17 países firmaron la "Convención del Metro" y se creó la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM), que en sus reglamentos estableció la necesidad de mantener reuniones con periodicidad no inferior a seis años.

Los comienzos del BIPM no fueron excesivamente alentadores, ya que fue imposible armonizar los sistemas de magnitudes y unidades, hasta las reuniones de los años 1954 y 1960 en los que un llamado Sistema Internacional de Unidades (SI) tomó existencia legal y adquirió paulatinamente ámbito mundial en especial en la comunidad científica.

Independientemente, en 1925 se creó la Comisión Internacional de Medidas y Unidades Radiológicas (ICRU), cuya misión más importante es hacer recomendaciones respecto a:

- Magnitudes y unidades de radiación y radiactividad.
- Métodos de medida y campos de aplicación en Radiobiología y Radiología Clínica.
- Datos y constantes físicas requeridas para la aplicación de estos procedimientos.

La ICRU también se ocupa en colaboración con la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), de la elaboración de normativa y recomendaciones en el campo de la Radioprotección.

Entre 1953 y 1962 la ICRU estableció las definiciones de las magnitudes de dosis absorbida, exposición, actividad y dosis equivalente y sus correspondientes unidades especiales *el rad, el roentgenio, el curio y el rem*. Con ellas se tratará de conocer, no solo la cantidad de radiación de un haz de radiación emitido por el ánodo, si no también la cantidad de radiación de dicho haz que es absorbida por la materia, y la probabilidad de producir efectos indeseables como consecuencia de esta absorción.

En 1975 a propuesta de la ICRU, la BIPM adoptó como unidades en el SI el Becquerelio y el Gray, abriéndose un período de 10 años para la adopción definitiva de las nuevas unidades. Finalmente, la unidad SI de dosis equivalente fue propuesta por la ICRU y ICRP en 1977 y aprobada por la BIPM en 1979.

En la actualidad se establecen tres tipos de unidades radiológicas distintas -de exposición, de absorción y de equivalencia biológica-; cada una de ellas cuantifica la radiación ionizante atendiendo a tres aspectos diferentes de las mismas pero complementarios entre sí.

### 3.2.- MAGNITUDES Y UNIDADES DE EXPOSICIÓN.

Las magnitudes y unidades de exposición son las encargadas de valorar la capacidad de ionización que posee un haz de radiación. Por esta razón, la magnitud de exposición se define como el cociente

$$X = dQ / dm$$

donde **dQ** es el valor absoluto de la carga total de todos los iones de un mismo signo producidos en el aire, cuando todos los electrones liberados por los fotones absorbidos en la masa **dm** hayan sido detenidos completamente en el aire.

Es decir, supuesto un determinado volumen o masa sobre la que incide un haz de fotones de radiación X, una parte de ellos ocasionarán ionizaciones en sus átomos. De estas ionizaciones se desprenderán electrones que serán detenidos, en mayor o menor grado, por ese volumen o masa.

En la figura 3.1. se constata de forma práctica lo que se acaba de mencionar. Sabemos que el aire se comporta como un dieléctrico en condiciones normales. Por ello, si en un circuito eléctrico simple, entre las placas del condensador existe un determinado volumen de aire, la aguja del galvanómetro no presentará ninguna oscilación. Si entre las placas del condensador se hace pasar un haz de radiación X o gamma sí se observará una oscilación de la aguja del galvanómetro. La explicación de este fenómeno nos viene dada en la definición antes mencionada: los fotones de rayos X o gamma han provocado ionizaciones en los átomos del aire, generando una carga de electrones y, por tanto, una pequeña corriente eléctrica. De esta forma se puede medir la cantidad de electricidad producida, que es proporcional a la cantidad de radiación que ha ionizado ese volumen de aire.

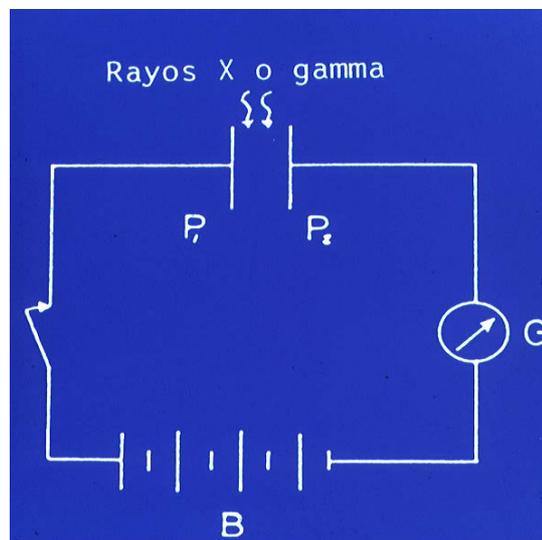


Fig. 3.1. Imágenes del circuito eléctrico, fundamento de un detector de radiación.

La unidad utilizada es el Roentgenio (R), definida como la exposición producida por un haz de radiación X o gamma, que absorbida en 1 cm<sup>3</sup> de aire seco (1,293 mgr. de peso) y en condiciones normales (Temperatura de 0<sup>o</sup> C y presión de 760 mm Hg) produce, por ionización, la liberación de una unidad electrostática de carga (1 u.e.c.).

La unidad moderna, que posteriormente ha sustituido al Roentgenio, en el SI, es el culombio/kg ( C/Kg.) (Fig.3.2)

La relación entre ambas unidades es la siguiente:

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$$



Fig. 3.2. Unidades de exposición.

Sin embargo, las unidades de radiación deben de expresarse en tasas de dosis, es decir, dosis de radiación por unidad de tiempo. Se define la **tasa de exposición** como  $dX/dt$  donde  $dX$  es el incremento de exposición durante el intervalo de tiempo  $dt$ . La tasa de exposición se expresa en **R/s** o **C/kg s**. Las unidades de tiempo día, hora y minuto pueden usarse en el SI. Frecuentemente se incorpora la distancia al foco emisor en la tasa de dosis : R/s a 1 metro de distancia. Para navegar por el resto de unidades es necesario conocer que un R equivale al depósito de 98 ergios/gr de tejido.

### 3.3.- MAGNITUD Y UNIDADES DE ABSORCIÓN.

Con las unidades anteriores se podía valorar la cantidad de radiación que produce un tubo de rayos X, y que suele medirse en aire (rendimiento del tubo). Sin embargo, con la dosis de absorción, de cualquier tipo de radiación ionizante, se pretende valorar la cantidad de radiación que es absorbida por la materia. La absorción de los fotones está representada por una cesión de energía al medio, que conlleva la desaparición o pérdida de parte de su intensidad. El uso clínico de los rayos X viene determinado por esta capacidad para ser absorbidos en diferentes grados por la materia. El resultado de dicha atenuación es la radiación emergente del paciente, y que impresionará la película radiográfica, con su valiosa información clínica.

Esta magnitud queda definida como el cociente

$$D = dE / dm$$

donde **dE** es el valor medio de la energía cedida por la radiación y absorbida por una cantidad de masa **dm**.

La unidad antigua es el rad, extraño nombre formado por las iniciales de **dosis de radiación absorbida** (radiation absorbed dose). En su definición se pretendió crear una unidad que sirviera para cualquier tipo de radiación, y se definía como la dosis de radiación que depositaba 100 ergios de energía por cada gramo de tejido (Fig.3.3).

Dado que el R era la cantidad de radiación que depositaba 98 ergios/gr. de tejido, y el rad es la cantidad de radiación que deposita 100 ergios/gr. de tejido, en la práctica clínica habitual se ha considerado que 1 Roentgenio es igual a 1 rad para rayos X y radiación gamma. Se comete un error, al menos de un 2%, y se debería determinar la temperatura y la presión en la que se han realizado las mediciones pero, aún así, se asume este margen de error para facilitar, en la práctica clínica, la utilización de dichas unidades.

No obstante, la unidad moderna en el SI es el **Gray** (Gy) =  $1\text{J.Kg}^{-1}$ . La definición de esta nueva unidad es sencilla: El Gray es la dosis de radiación absorbida que equivale a 100 rads. La equivalencia entre estas dos unidades es:

$$\begin{aligned} 1 \text{ rad} &= 100 \text{ ergios/gramo} \\ 1 \text{ Gy} &= 100 \text{ rad.} \end{aligned}$$

Dado que ésta es una unidad que expresa una cantidad considerable de radiación, en radiodiagnóstico se utilizan submúltiplos de la misma:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cGY} &= 1 \text{ rad} \\ 1 \text{ mGy} &= 0,1 \text{ rad} \end{aligned}$$

La dosis absorbida se define para cada punto del material irradiado. Por tanto, cuando se habla de la dosis en un órgano o tejido, se supone que nos referimos al valor promedio del total absorbido, y en cada uno de los gramos que componen ese volumen irradiado.

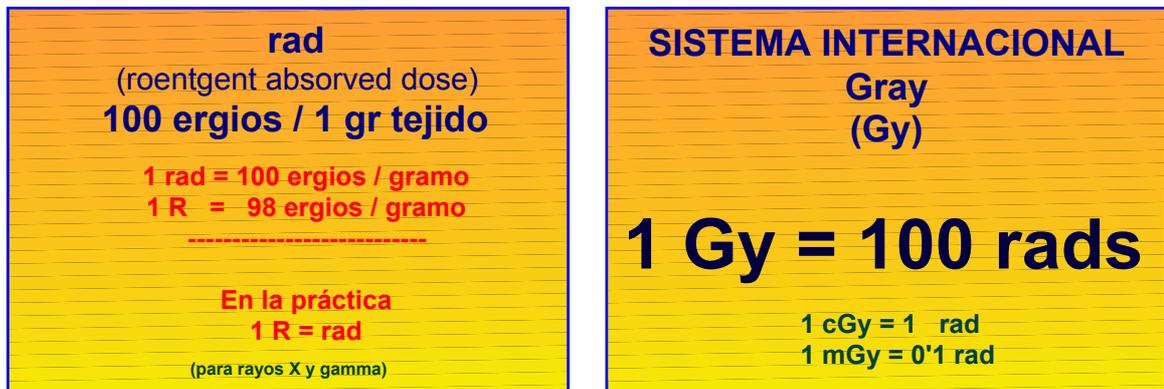


Fig. 3.3. Unidades de absorción.

La dosis absorbida, que es la magnitud dosimétrica de más interés, resulta válida para cualquier tipo de radiación y requiere la especificación del material en el que se produce la interacción.

Como en el caso de la tasa de exposición, aquí la **tasa de dosis absorbida** se define como el cociente  $dD/dt$  donde  $dD$  es el incremento de dosis absorbida durante el intervalos de tiempo  $dt$ , y se expresa en Gy/s, Gy/min o Gy/h.

$$D = dD/dt$$

### 3.4.- MAGNITUD Y UNIDADES DE EQUIVALENCIA.

A pesar de la minuciosidad en la elaboración de las magnitudes radiológicas nombradas hasta ahora, pronto quedó patente que una misma cantidad de dosis de radiación absorbida podría provocar unos efectos biológicos muy diferentes, en función del tipo de agente que emitía o producía la radiación ionizante que se absorbía.

Según se ha podido comprobar en estudios efectuados sobre efectos biológicos de la radiación, la dosis absorbida en un tejido orgánico no determina el efecto biológico resultante ya que intervienen otros factores como la naturaleza de la radiación, energía y espectro de la radiación, tipo de efecto biológico, etc.

Por esta razón la radiobiología ha dirigido sus esfuerzos en la definición de una nueva magnitud que tome en consideración la pluralidad de los efectos biológicos que se observan. Dado que la mayoría de los conocimientos sobre efectos biológicos se adquirieron sobre animales de experimentación, especialmente mamíferos, la nueva unidad creada define la radiación que es equivalente entre los mamíferos (radiation equivalent mammalian): rem (Fig.3.4).

La definición de rem también debería expresar una comparación entre los diferentes agentes productores de radiación. Así pues, el rem es la cantidad de radiación ionizante, de cualquier tipo de radiación ionizante, que tiene el mismo efecto biológico que un rad de rayos X producido a 200 KeV. En radiodiagnóstico se acepta que, puesto que los rayos X más utilizados poseen un Kilovoltaje pico (Kvp) de 150 KeV, serán éstos los que se utilicen como regla para comparar el efecto biológico de las radiaciones ionizantes. En la práctica clínica, aunque se vuelve a cometer un pequeño error, se admite que 1 rad es igual a 1 rem para rayos X y radiación gamma.

Sin embargo, para valorar otros tipos de radiación ionizante se creó el concepto de Eficacia Biológica Relativa (EBR). En la práctica la Eficacia Biológica Relativa representa el cociente en donde se compara el efecto biológico de un rad de rayos X producido a 200 KeV, con el efecto biológico de un rad de cualquier otro tipo de radiación ionizante. El resultado es un número adimensional que recibe la denominación de Factor de Calidad ( Q ), y que expresa el grado de agresividad de los diferentes tipos de radiación en su comparación con los rayos X. (Tabla 3.1)

**rem**  
**(roentgent equivalent mammalian)**

**rads radiación problema**  
**E.B.R.= -----**  
**rads rayos x 200 kV**

**1 rad = 1 rem**

**1 R = 1 rad = 1 rem**  
**(para rayos X y gamma)**

Fig. 3.4. Unidad antigua de equivalencia .

**Tabla 3.1. Factor Q en los distintos tipos de radiación.**

<b>Tipo de radiación</b>	<b>Q</b>
Radiación X y/o gamma (*)	1
Electrones y partículas beta (*)	1
Partículas beta del tritio	2
Protones y neutrones	25
Partículas alfa	25
Productos de fisión	25
Núcleos de retroceso	25

(\*) Energía mayor de 30 keV

Con posterioridad se instauró, arbitrariamente, una nueva unidad para su uso en el S.I.. Esta unidad es el Sievert ( Sv ) Por analogía con la definición que se realizó de la dosis de absorción, se define el Sievert (Fig.3.5) como la dosis de radiación que es equivalente a 100 rem. También en este caso se emplean los submúltiplos de esta unidad:

1 cSv = 1 rem  
 1 mSv = 0,1 rem



Fig. 3.5. Unidades de Equivalencia biológica.

El uso cotidiano y frecuente del milisievert (mSv) en la práctica habitual lo ha convertido en la unidad moderna e internacional de equivalencia biológica y, como consecuencia de ello, en la unidad más empleada en Protección Radiológica.

La tasa de dosis equivalente se define como el cociente  $dH/dt$ , en donde dH es el incremento de dosis equivalente en el intervalo temporal dt. Las unidades quedan expresadas en rem/h. o Sv/h.

Como complemento a todo lo anterior, hoy en día la dosis equivalente se expresa de la siguiente forma:

$$H = D Q N$$

donde **D** representa la dosis absorbida, **Q** es el factor de calidad y **N** aglutina en forma numérica, cualquier otro factor modificante conocido.

El factor N representa el producto de posibles factores modificantes señalados por el ICRP (tasa de dosis absorbida, forma de fraccionamiento de la dosis total, etc.). Actualmente como el ICRP no ha dado valores para N distintos de la unidad ni parece probable que se haga en un futuro próximo, se ha acordado suprimir el factor N en la definición, por lo que a partir de ahora, la dosis equivalente se expresa como

$$H = D Q$$

En la actualidad se define como **Dosis equivalente** el promedio de las dosis absorbidas en los tejidos u órganos, ponderadas únicamente por el factor de ponderación de la radiación ( $W_R$ ). Su unidad es el J/Kg, que recibe el nombre de Sievert.

$$H_T = \sum W_R \cdot D_{T,R}$$

donde,

$H_T$  = dosis equivalente

$D_{T,R}$  = dosis absorbida en el tejido u órgano

$W_R$  = factor de ponderación de la radiación, que depende exclusivamente de las características de la radiación, en concreto de su transferencia lineal de energía (LET).

El término Q es sustituido, desde 1990, por el  $W_R$  (Tabla 3.2):

**Tabla 3.2. Factores de ponderación de la radiación ( $W_R$ ).**

Tipo y rango de energías	Factor $W_R$
Fotones (todas energías)	1
Electrones (todas energías)	1
Neutrones: energía < 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protones energía > 2 MeV	5
Partículas alfa, productos de fisión y núcleos pesados	20

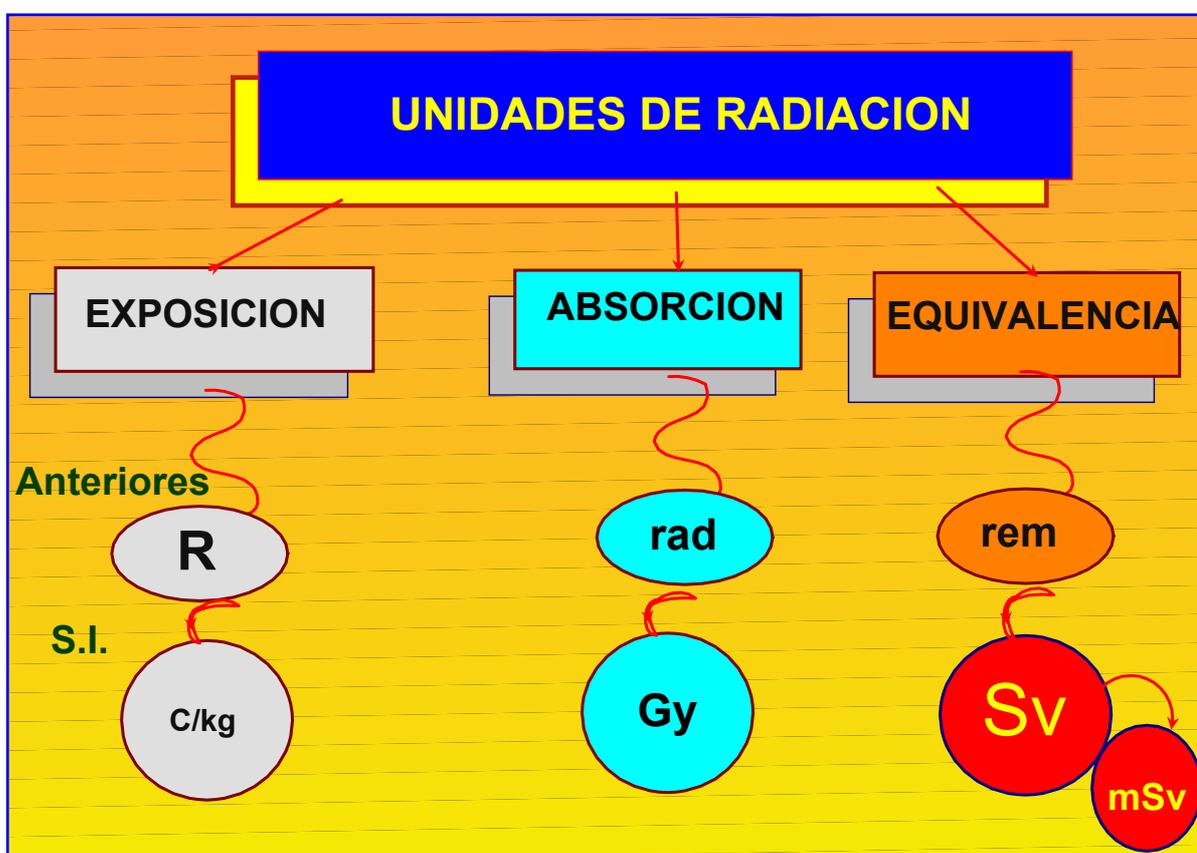


Fig. 3.6. Unidades de radiación ionizante.

### 3.5.- MAGNITUDES DERIVADAS.

Con objeto de evaluar los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la población, o sobre individuos aislados en casos de localización de dosis en algún tejido u órgano, la ICRP ha propuesto una serie de magnitudes derivadas, entre las que destacan la **Dosis efectiva**.

Esta magnitud representa la media ponderada de las dosis equivalentes recibidas en distintos órganos, y viene dada por la expresión:

$$H_e = \sum W_i H_i$$

donde  $W_i$  es el factor de ponderación para el órgano  $i$ , que representa la proporción de riesgo estocástico resultante de la irradiación del tejido  $i$ , respecto al riesgo total cuando la totalidad del organismo es irradiado uniformemente, y  $H_i$  es la dosis equivalente recibida por el tejido  $i$ .

Como resultado de las recomendaciones de 1990 de la ICRP la magnitud dosis equivalente efectiva pasa a denominarse **dosis efectiva**, representa la contribución relativa de los tejidos u órganos en el detrimento resultante de la irradiación uniforme del organismo completo.

Se recomiendan nuevos factores de ponderación para órganos y tejidos (Tabla 3.3).

$$E = \sum W_T \cdot H_T$$

donde,  $E$  = dosis efectiva

$W_T$  = factor de ponderación del tejido

$H_T$  = dosis equivalente de cada tejido

**Tabla 3.3. Variaciones de la dosis efectiva desde 1977 a 1990 propuestas por la ICRP**

	ICRP 1977	ICRP 1990
MEDULA ÓSEA	0,12	0,12
VEJIGA	-	0,05
SUPERFICIE ÓSEA	0,03	0,01
MAMA	0,15	0,05
COLON	-	0,12
GÓNADAS	0,25	0,20
HÍGADO	-	0,05
PULMONES	0,12	0,12
ESÓFAGO	-	0,05
PIEL	-	0,01
ESTOMAGO	-	0,12
TIROIDES	0,03	0,05
RESTO	0,3	0,05

### 3.6.- DOSIS SUPERFICIAL Y DOSIS PROFUNDA.

- La dosis equivalente profunda individual  $H_p(d)$ , es la dosis equivalente en tejido blando situado por debajo de un punto especificado del cuerpo, a una profundidad  $d$ , apropiada para medir la radiación fuertemente penetrante. Se recomienda una distancia en profundidad de 10 mm, y suele conocerse con la abreviatura  $H_p(10)$ .

- La dosis equivalente superficial individual,  $H_s(d)$ , es la dosis equivalente en tejido blando situado por debajo de un punto especificado del cuerpo, a una profundidad  $d$ , apropiada para radiación débilmente penetrante. Se aconseja una distancia en profundidad de 0,07 mm, y se reconoce mediante las letras  $H_s(0'07)$ .

Con fines de vigilancia del personal se introducen dos conceptos. El primero de ellos  $H_p(d)$ , sirve para órganos profundos que sean irradiados con radiación fuertemente penetrante, y el segundo,  $H_s(d)$ , sirve para órganos superficiales que sean irradiados tanto por radiación débil como fuertemente penetrante. Con ello se pretende poner de manifiesto la importancia clínica del tipo de radiación en la evaluación de los riesgos biológicos del personal profesionalmente expuesto a radiación ionizante.

### 3.7.- MAGNITUDES DE INTERÉS EN LA DOSIMETRÍA DEL PACIENTE.

Los exámenes de radiodiagnóstico pueden implicar la irradiación total o parcial de muchos de los órganos del cuerpo humano. Conociendo la dosis recibida por cada órgano durante una exploración determinada, se puede conocer la probabilidad de la aparición de un efecto biológico utilizando los factores de riesgo apropiados.

Sin embargo, la medida directa de las dosis en órganos está limitada a unos cuantos órganos superficiales (tiroides o mama), que con dosímetros fijados en la piel del paciente permitirán un cálculo de la dosis recibida por el órgano. Las dosis recibidas por órganos más profundos sólo se pueden estimar indirectamente a partir de las medidas de la dosis en piel utilizando modelos apropiados. La aplicación correcta de dichos modelos es difícil para los exámenes complejos. Estos métodos indirectos de cálculo de dosis conducen inevitablemente a conceptos de incertidumbre matemática.

Un método alternativo consiste en la estimación de la energía total impartida al paciente independientemente de cómo está distribuida en el cuerpo. Esta técnica es menos rigurosa, pero depende de una simple medición de la dosis, incluso en el examen más complejo. Se cree que este método puede proporcionar una medida tan realista del riesgo al organismo como la determinada por las medidas de las dosis recibidas por órganos individuales.

La energía total impartida al paciente puede calcularse a partir de medidas del producto de la exposición por área de examen, utilizando cámaras de transmisión de gran superficie, que se puede fijar fácilmente al colimador del tubo de rayos X y que integra la exposición sobre el área de cada haz de rayos X. Esta exposición total puede convertirse en energía impartida utilizando los factores de conversión que dependen principalmente del kV y de su filtración total.

El método más generalizado es la utilización de fantasmas o maniqués, de similares características al órgano o zona explorada, y con la colocación de múltiples dosímetros de termoluminiscencia se trata de establecer las curvas de isodosis para valorar la dosis media del órgano. Gracias a este método queda patente la dificultad práctica para poder determinar la dosis de radiación para cada uno de los órganos, en cada exploración y en cada sala. El procedimiento solo permite establecer márgenes de dosis o dosis de referencia para dichas exposiciones, que facilitan el control de la exposición del paciente.

### BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

INSTITUTO ESTATAL NORUEGO DE RADIOHIGIENE (1984).- *Manual de Radiohigiene*. Akal/Universitaria, Madrid (pp.87-101).

FROMMER,H. (1993).- *Radiología para el auxiliar de odontología* (5ªed).Mosby,Madrid (pp.47-50).

PASLER,H. (1991).- *Radiología Odontológica* (2ºed).Masson-Salvat Odontologica,Barcelona (pp.351-355)