

TEMA 3
UNIDADES RADIOLÓGICAS
Miguel Alcaraz Baños

Objetivos generales.

1. Definir el C/Kg como unidad de exposición en el Sistema Internacional.
2. Explicar el concepto de "tasa" aplicado a las unidades radiológicas.
3. Introducir el rad y el Gray como unidades de dosis de absorción.
4. Establecer la relación entre la dosis absorbida con la exposición de un haz de fotones.
5. Describir el interés de utilización de la dosis equivalente.
6. Establecer la relación entre rem y Sievert.
7. Explicar la relación entre Gray y Sievert.
8. Distinguir entre dosis superficial y dosis profunda en el profesionalmente expuesto.
9. Diferenciar entre dosis de entrada y dosis en órganos.
10. Definir dosis efectiva
11. Definir dosis colectiva
12. Diferenciar entre dosis en aire, dosis absorbida en el paciente y el efecto lesivo de esa dosis en el paciente.

TEMA 3

MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS

Miguel Alcaraz Baños

3.1.- INTRODUCCIÓN.

Los haces de rayos X utilizados en radiodiagnóstico están formados por fotones que al interactuar con el paciente le transfieren parte de su energía. La cantidad total de energía depositada en una masa de material biológico o en el paciente, se puede correlacionar bastante bien con los efectos biológicos resultantes.

La protección de las personas frente a los efectos de la radiación ionizante utilizada en radiodiagnóstico, exige la medida de la cantidad de radiación y, para ello, se debe establecer de forma precisa la magnitud a medir, el procedimiento de medida y la unidad de medida utilizada.

Los organismos internacionales que se ocupan de estos aspectos son:

- **La Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM)**, que define y adopta las unidades internacionalmente aceptadas .

- **La Comisión Internacional de Medidas y Unidades Radiológicas (ICRU)**, cuya misión es hacer recomendaciones respecto a:

- Magnitudes y unidades de radiación y radiactividad.
- Métodos de medida en Radiobiología y Radiología Clínica.
- Datos y constantes físicas requeridas para la aplicación de los métodos anteriores.

La ICRU se ocupa además, en colaboración con la **Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)**, de elaborar recomendaciones en el campo de la Radioprotección.

Entre 1953 y 1962 la ICRU definió las magnitudes radiológicas: exposición, dosis absorbida y dosis equivalente y estableció sus unidades (Röntgen, rad y rem). Estas unidades han sido substituidas por otras nuevas, ya que en **1975** la BIPM adoptó unas nuevas unidades para el **Sistema Internacional (S.I.)** : Culombio/Kg para la exposición, para la dosis absorbida el Gray y en **1979** para la dosis equivalente el Sievert.

Cuando se había llegado a un acuerdo internacional sobre la medida de la radiación, hubo que cambiarlo todo al Sistema Internacional, más moderno. Realmente, el grupo de expertos lo que hizo fue cambiarlo "todo" para apenas cambiar "algo", ya que la experiencia había demostrado que esas unidades antiguas y que ahora se quedaban anticuadas habían servido eficazmente en su utilización habitual.

4.2.- MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS BÁSICAS.

A) UNIDADES DE EXPOSICIÓN.

Las unidades de exposición son las encargadas de valorar la capacidad de ionización que posee un haz de radiación en el aire. 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.

Aunque parece un poco complicado, quizás sea la forma más sencilla de introducirse en el mundo de las "complicadas" unidades radiológicas. La forma más directa de ponerse en contacto con estas unidades radiológicas es construir un detector de radiación. Para ello, basta con adquirir una pila, un interruptor, un pequeño portalámparas y una bombilla. Si queremos hacerlo más complicado

podemos incorporar también un galvanómetro, que consiste en un sencillo aparato para medir el paso de corriente eléctrica. Con todo ello se puede construir un circuito eléctrico como el de la Fig.3.1.

En esta Fig.3.1^a, el interruptor no está accionado, por lo que el circuito eléctrico está abierto, no hay paso de corriente eléctrica y la bombilla está apagada. Si accionamos el interruptor, la corriente eléctrica de la pila llega al filamento de la bombilla y éste se pone incandescente emitiendo luz; como la corriente eléctrica sigue por el circuito, llega al galvanómetro y éste marca el paso de una cantidad de corriente eléctrica (Fig.3.1b).

Si volvemos a accionar el interruptor, el circuito se corta, la luz se apaga, y el galvanómetro vuelve a marcar cero, ya que no hay “paso” de corriente eléctrica; volvemos a la situación de la Fig.3.1a.

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

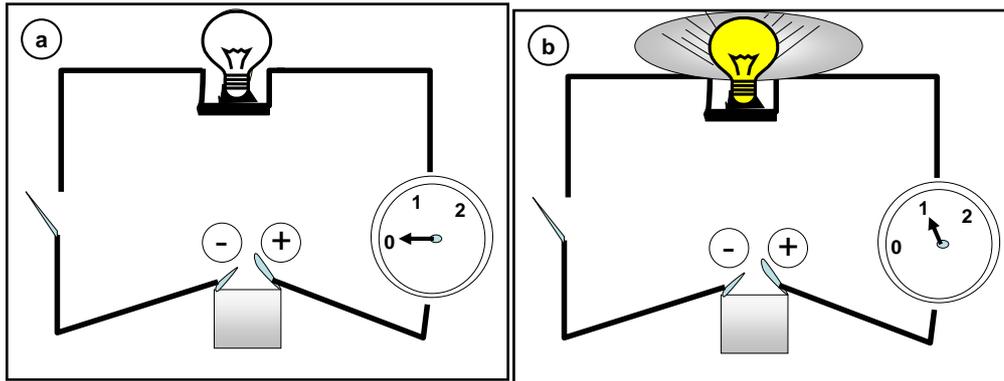


Fig. 3.1. Circuito eléctrico: a) Interruptor abierto, no hay paso de corriente eléctrica; b) Interruptor cerrado, hay paso de corriente eléctrica.

Pues bien, si ahora quitamos el portalámparas y la bombilla, dejando sólo un hueco con aire (Fig. 3.2a), aunque accionemos el interruptor, la corriente eléctrica llegará hasta el hueco que hemos establecido con aire, y dado que el aire no transmite la corriente eléctrica, la distancia es insalvable, no hay paso de corriente y el galvanómetro marcará cero (ausencia de paso de corriente eléctrica).

Sin embargo, si ahora hacemos incidir radiación ionizante (rayos X o rayos gamma) sobre ese aire que no conducía la corriente eléctrica, ahora la situación va a cambiar: el aire se va a ionizar, ya que los fotones de radiación van a arrancar algunos electrones corticales de los átomos del aire (electrones con carga negativa), y los átomos que han sufrido ese proceso quedan cargados con un protón de más (carga positiva). Como están sometidos a un campo eléctrico producido por la pila: los electrones arrancados (-) se dirigirán hacia el polo de signo contrario (positivo), y los átomos con carga positiva se dirigirán hacia el polo negativo. Este movimiento de electrones es “paso” de corriente eléctrica, que atravesará ese hueco formado por el aire y podrá ser medido por el galvanómetro (Fig.3.2b). Cuanta mayor sea la cantidad de radiación ionizante que incide sobre el aire, mayor cantidad de ionizaciones se producirán en ese aire, y mayor “paso” de corriente eléctrica será medida por el galvanómetro. La cantidad de corriente eléctrica que mida el galvanómetro es proporcional a la cantidad de radiación que incidían sobre el aire.

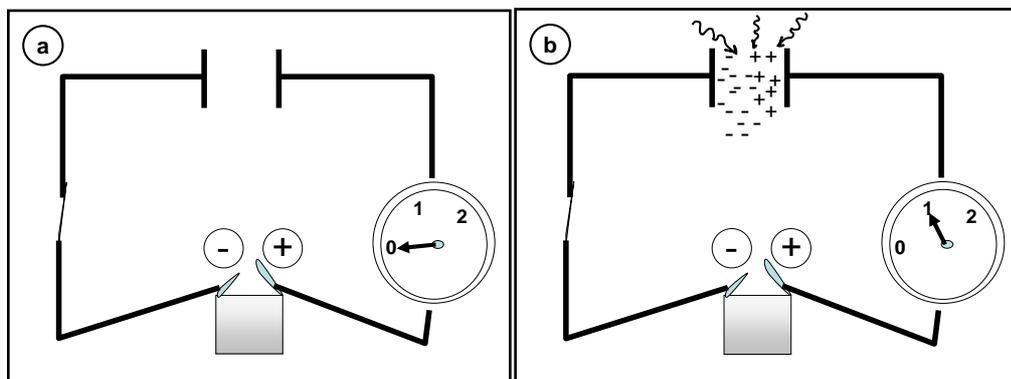


Fig. 3.2. Fundamento de un detector de radiación: a) Circuito eléctrico, sin paso de corriente; b) Proporcionalidad entre ionización y “paso” de corriente eléctrica.

La unidad utilizada se denomina Roentgenio (**R**), en honor del descubridor de los rayos X: Wilhem Conrad Roentgen (Fig.3.3). Se define como la exposición producida por un haz de radiación X o gamma, que absorbida en 1 cm³ de aire seco (1,293 mg de peso) y en condiciones normales (Temperatura de 0^o C y presión de 760 mm Hg) produce, por ionización, la liberación de una unidad electrostática de carga (1 u.e.c.) (Fig.3.4).

Sin embargo, tuvo que ser sustituida por una nueva unidad para el Sistema Internacional: **culombio/kg (C/Kg.)** (Fig.3.4), y que se puede obtener simplemente por una relación matemática (Fig.3.5).

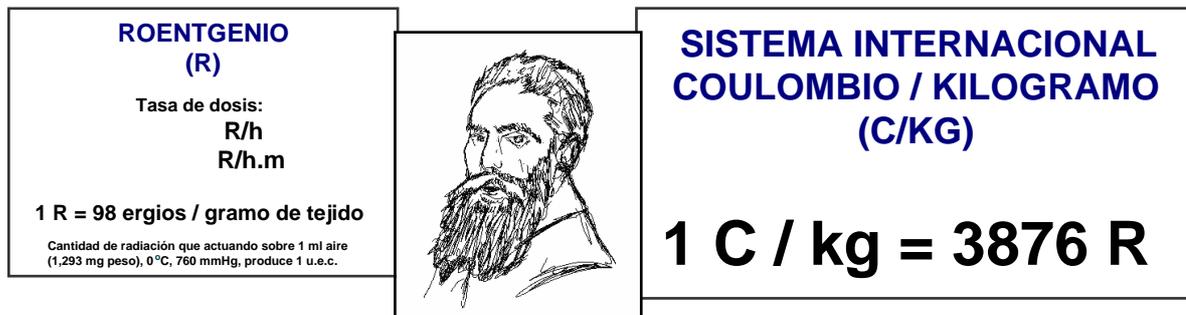


Fig. 3.3. Unidad de exposición: Roentgenio.

Fig. 3.5. Unidad de exposición para el S.I.: coulombio/kg.

Fig. 3.4. Roentgen.

Sin embargo, las unidades de radiación deben de expresarse en tasas de dosis, es decir, dosis de radiación por unidad de tiempo. 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. Además, dada la enorme influencia de la distancia (ley inversa del cuadrado de la distancia) en la medida de la dosis de radiación se suele incorporar la distancia al foco emisor en la tasa de dosis: R/s a 1 metro de distancia. Así una medida de 8 R/h m, nos permite conocer que la dosis a la que nos exponemos aumentando la distancia al doble (2 metros) sería de 2 R/h, o si la disminuimos a 0'5 metros, la dosis a la que estamos expuestos sería 32 R/h.

Por último, para navegar por el resto de unidades es necesario conocer que un R equivale al depósito de 98 ergios/g de tejido biológico, y a partir de este dato, se puede navegar por el resto de unidades.

B) UNIDADES DE ABSORCIÓN.

Con la unidad anterior 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, lo importante es conocer la cantidad de radiación que era absorbida por la materia, o por el paciente. En radiodiagnóstico, cuanto más absorbiera los tejidos del paciente, más radioopaco aparecerían en la imagen; cuanto menos absorbiera el paciente, más negro y radiotransparente aparecerían los tejidos en la imagen radiológica. El uso clínico de los rayos X viene determinado por esta capacidad para ser absorbidos en diferentes grados por los tejidos del paciente. El resultado de dicha atenuación es la radiación emergente del paciente, y que impresionará la película radiográfica, con su valiosa información médica.

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 las palabras “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.3.6).

En radiodiagnóstico, dado que el R era la cantidad de radiación que depositaba 98 ergios/g de tejido, y el rad es la cantidad de radiación que deposita 100 ergios/g de tejido biológico, 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, además, se asume este margen de error para facilitar, en la práctica clínica, la utilización de dichas unidades.

Sin embargo, esta unidad tuvo que ser sustituida por una nueva unidad para el Sistema internacional (SI). Arbitrariamente, se la denomina como Gray (Gy), en honor de Louis Arnold Gray, importante radiobiólogo inglés (Fig.3.7). El Gray es la cantidad de radiación que deposita una energía de 1 J. Kg^{-1} . El Gray es la dosis de radiación absorbida que equivale a 100 rads.

Dado que ésta es una unidad que expresa una cantidad considerable de radiación, en radiodiagnóstico se utilizan los submúltiplos de la misma (Fig.3.8)

rad
(roentgen absorbed dose)
100 ergios / 1 gr tejido

1 rad = 100 ergios / gramo
1 R = 98 ergios / gramo

En la práctica
1 R = rad
(para rayos X y gamma)

Fig.3.8: Unidad de absorción: rad

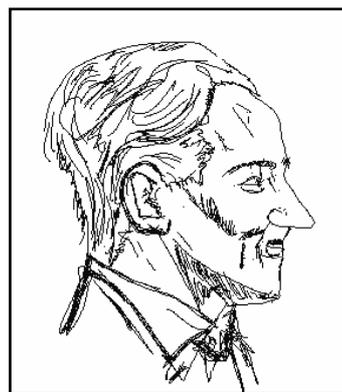


Fig. 3.7. Louis Arnold Gray

SISTEMA INTERNACIONAL
Gray
(Gy)

1 Gy = 100 rads

1 cGy = 1 rad
1 mGy = 0'1 rad

Fig.3.8: Unidad de absorción: Gray

La dosis absorbida, que es la magnitud dosimétrica de más interés, resulta valida 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 entre el incremento de la dosis absorbida durante un intervalo de tiempo, y se expresa en Gy/s, Gy/mn o Gy/h.

C) 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 ionizante que emitía o producía la radiación.

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. En otras palabras, en unas ocasiones se observaba que 20 rads de rayos X no producían ningún tipo de lesión biológica en un animal de experimentación irradiado, mientras que 20 rads producidos por neutrones rápidos provocaba la muerte del animal: una misma dosis de radiación absorbida presentaba unos efectos biológicos muy diferentes.

Por esta razón la radiobiología ha dirigido sus esfuerzos en la definición de una nueva unidad que tome en consideración 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 unidad creada para tal fin 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 (α , β , γ , X...etc.,) 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 medida para comparar el efecto biológico de las radiaciones ionizantes. En la práctica, cuando se compara un rad de rayos X con un rad de rayos X, el cociente es la unidad. Así pues, dado que en Radiodiagnóstico no utilizamos rayos generados a 200 kVp, aunque se vuelve a cometer un pequeño error, pero se admite que 1 rad es igual a 1 rem para rayos X y radiación gamma (Fig.3.9).

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 cualquier tipo de radiación ionizante, con el efecto biológico de un rad de rayos X producido con 200 keV. El resultado es un número adimensional que recibía la denominación de Factor de Calidad (Q), y que expresa el grado de agresividad de los diferentes tipos de radiación cuando se comparaban con los rayos X. (Tabla 3.1). En realidad lo que representa es cuánto más lesivo son los otros agentes ionizantes, cuando se comparan con los rayos X. El término Q (factor de calidad) ha sido sustituido, desde 1990, por el termino W_R . (Factor de ponderación de los tejidos).

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. 3.9. Unidad antigua de equivalencia : rem.

Sin embargo, otra vez esta unidad tuvo que ser sustituida por una nueva unidad para el Sistema Internacional. Arbitrariamente, esta nueva unidad se ha denominado Sievert (Sv), en honor al Profesor sueco Rof Sievert (Fig.3.10). Por analogía con la definición que se realizó de la dosis de absorción, se define el Sievert (Fig.3.11) como la dosis de radiación que es equivalente a 100 rem. También en este caso se emplean los submúltiplos de esta unidad:

SISTEMA INTERNACIONAL SIEVERT (Sv)

1 Sv = 100 rem

1 cSv = 1 rem

1 mSv = 0.1 rem

10 mSv = 1 rem



Fig. 3.11. Unidades de Equivalencia biológica: Sievert.

Fig. 3.10: Rof Sievert

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.

Como en los casos anteriores, aquí la **tasa de dosis equivalente** se define como el cociente entre el incremento de la dosis equivalente en un intervalo de tiempo. Las unidades quedan expresadas en Sv/h, mSv/mn, microSv/s....

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

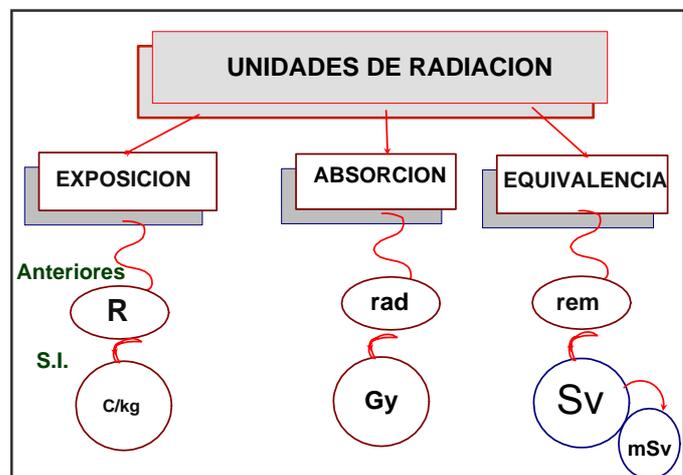


Fig. 3.12. Unidades Radiológicas

En la actualidad se define como **Dosis equivalente** el promedio de las dosis absorbidas en los tejidos u órganos irradiados, 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).

A pesar de todo, determinar la dosis de radiación que absorbe un órgano irradiado resulta muy difícil, sobretodo si se trata de un órgano que no es superficial. Para ello, se utilizan las Curvas de Isodosis. Cuando se irradia un paciente, podemos considerar como el 100 % de la radiación absorbida la que llega hasta su piel; pero conforme la radiación vaya penetrando en el paciente, el tejido de éste irá absorbiendo parte de esa radiación. Si en el interior del paciente, pudieramos unir los diferentes puntos que tienen la misma dosis de radiación, dibujaríamos unas curvas que tienen la misma dosis de radiación: Curvas de isodosis (Fig.3.12). por ello se suele hablar de diferentes conceptos para determinar la dosis de radiación que se absorben e las diferentes exploraciones radiológicas: Dosis Piel a la entrada del paciente (a); Dosis Piel a la Salida del Paciente (b); Dosis media (c)...etc.,.

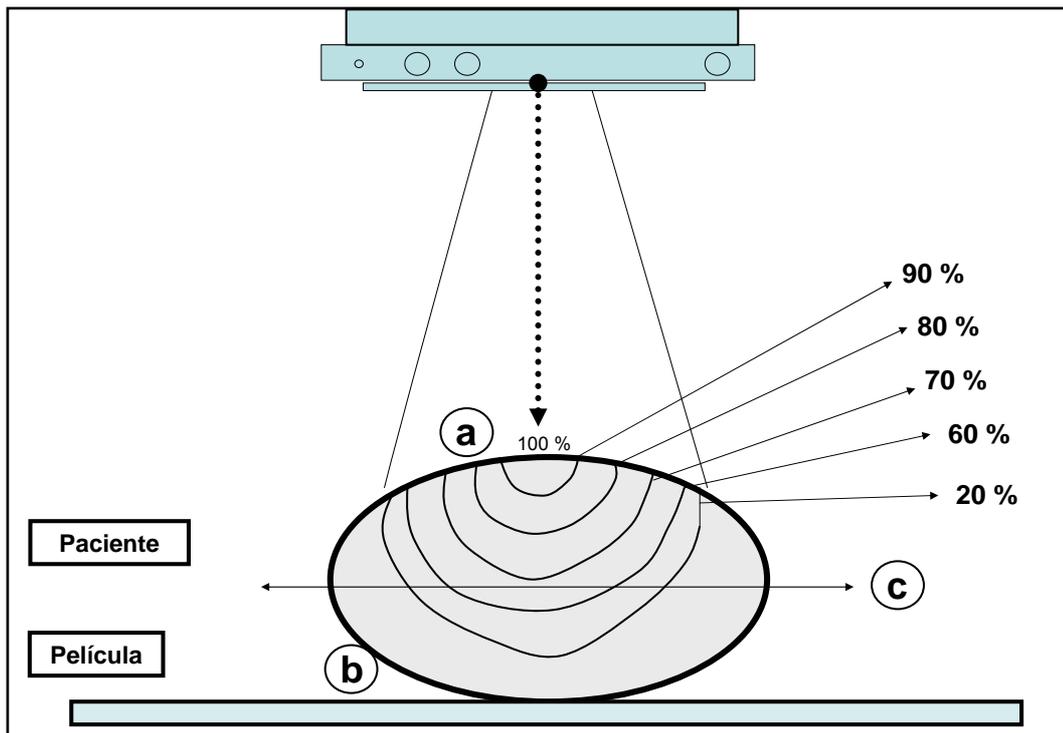


Fig. 3.13. Curvas de Isodosis.

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:

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

donde, E = dosis efectiva

W_T = factor de ponderación del tejido

H_T = dosis equivalente de cada tejido

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

Tabla 4.3. Factores de ponderación de los tejidos

(ICPR: Comisión Internacional de Protección Radiológica)

	ICRP 1990
GÓNADAS	0,20
MEDULA ÓSEA	0,12
COLON	0,12
PULMONES	0,12
ESTOMAGO	0,12
VEJIGA	0,05
MAMA	0,05
HÍGADO	0,05
ESÓFAGO	0,05
TIROIDES	0,05
PIEL	0,01
SUPERFICIE ÓSEA	0,01
RESTO	0,05

Otra forma de utilizar las magnitudes radiológicas es la utilización de las **Dosis colectivas**: Son magnitudes que sirven para caracterizar la irradiación de grupos de personas o de poblaciones de cara a la evaluación de los riesgos asociados a una determinada práctica. Se utilizan la dosis equivalente colectiva, referida a un órgano o tejido y la dosis efectiva colectiva. La unidad es el Sievert persona o Sievert hombre (Sv-persona).

3.3.- DOSIS SUPERFICIAL Y DOSIS PROFUNDA.

Con fines de vigilancia personal se introduce el concepto de dosis equivalente personal profunda $H_p(d)$, utilizado cuando se irradian órganos profundos con radiación penetrante, y el concepto de dosis equivalente personal superficial $H_s(d)$, utilizado cuando se irradian órganos superficiales con radiación poco penetrante.

La dosis profunda $H_p(10)$, es el equivalente de dosis en tejidos blandos, situados por debajo de un punto específico del cuerpo, a una profundidad de 10 mm. apropiada para radiación fuertemente penetrante.

La dosis superficial $H_s(0.07)$, es el equivalente de dosis en tejido blando situado por debajo de un punto específico del cuerpo (0,07 mm.) apropiada para radiación poco penetrante.

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 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 (Producto Dosis-Área (PDA))

El método más generalizado es la utilización de fantasmas o maniqués, de similares características al órgano o zona explorada, y la colocación de múltiples dosímetros de termoluminiscencia se tratan 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)