

Resumen de unidades

- **Activity** is the transformation (disintegration) rate of a radioactive substance
 - Curie (Ci)
 - Becquerel (Bq) - S.I. Unit
 - 1 Bq = 1 disintegration per second (dps) 1 Ci = 3.7×10^{10} dps = 3.7×10^{10} Bq
- **Absorbed dose** is a physical quantity which represents the energy imparted by radiation onto an absorbing material.
 - Rad = 100 ergios / 1g
 - Gray (Gy) - SI Unit 1 Gy = 1 joule per kilogram 1 Gy = 100 rads
- **Dose Equivalent (DE)** may be regarded as an expression of dose in terms of its biological effect. DE takes account of the fact that, for a given absorbed dose, such as 1 Gray, a radiation of one type and/or energy may give rise to a greater biological effect than a radiation of another type and/or energy.

DE = Absorbed Dose x Quality Factor (Q) , Q depends on the type of radiation.

 - Q = 1 for gamma, x-ray and beta
 - Q = 10 for alpha

Q is used to compare the biological damage producing potential of various types of radiation, given equal absorbed doses. The effectiveness of radiation in producing damage is related to the energy loss of the radiation per unit path length. The term used to express this is Linear Energy transfer (LET). Generally, the greater the LET in tissue, the more effective the radiation is in producing damage.

 - rem (Roentgen Equivalent Man)
 - SIEVERT (Sv) - S.I. Unit 1 Sv = 100 rems
- **Exposure** is a quantity that expresses the ability of radiation to ionize air and thereby create electric charges which can be collected and measured
 - Roentgen (R) 1 R = 2.58×10^{-4} C/kg of air

Protección radiológica

La protección radiológica es aquella disciplina de la dosimetría que establece los riesgos debidos a los efectos de la radiación ionizante sobre organismos vivos.

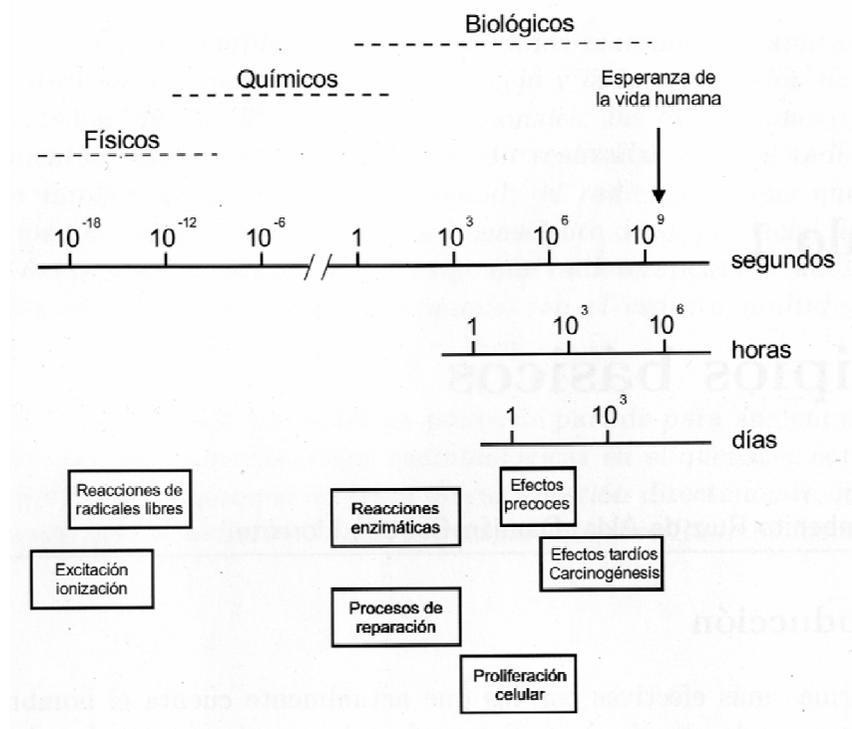


Figura 1.1: La escala de tiempos radiobiológica. Tomado de [153].

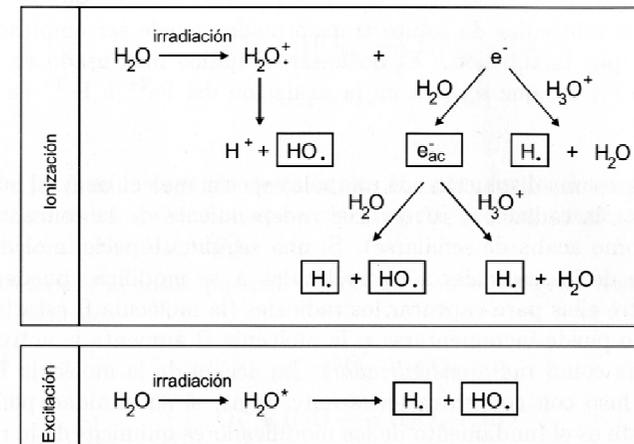
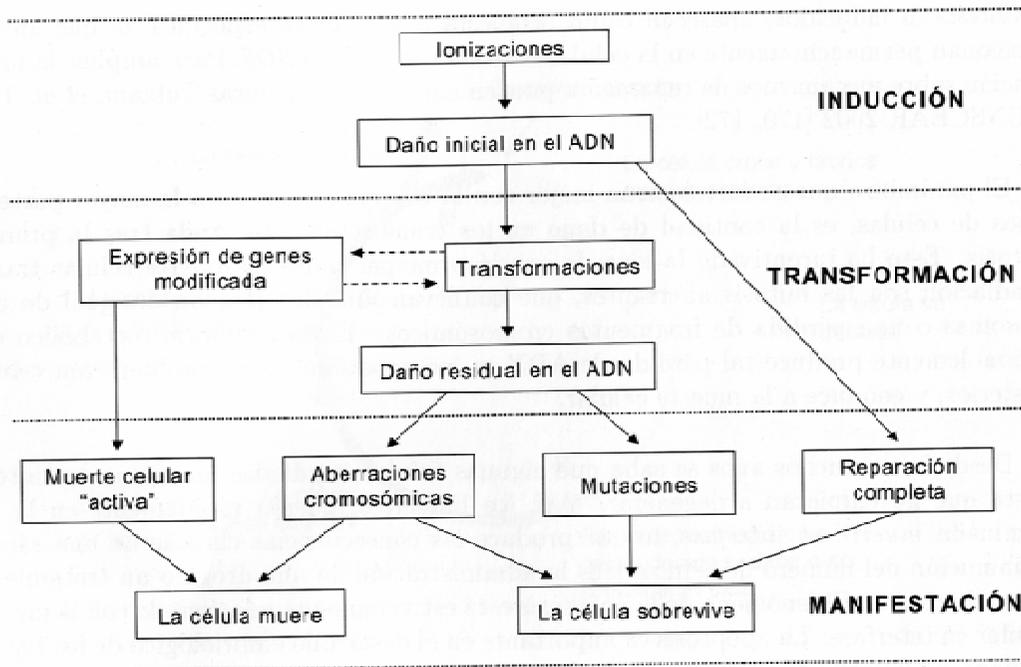
Los efectos de la radiación sobre los organismos vivos se suelen dividir en

1. Físicos: se producen de modo instantáneo (orden ns) por la interacción de la radiación con los átomos del tejido. Los electrones secundarios producen más ionizaciones hasta que termalizan. Una dosis de 1Gy produce 10^5 ionizaciones en un volumen celular de $10\mu\text{m}$ de diámetro.
2. Químicos: se producen ionizaciones en las moléculas, se rompen enlaces químicos y se liberan radicales libres altamente reactivos. Estos procesos suelen ser rápidos (orden ms)
3. Fase Biológica: muchas de los daños químicos (incluso el ADN) son reparados posteriormente mediante reacciones enzimáticas. Algunas lesiones no son reparadas y pueden conducir a la muerte celular bien por su gravedad o por su número. Los efectos radioinducidos suelen tardar semanas o meses en aparecer. Los efectos como carcinogénesis pueden tardar varios años tras la exposición a la radiación.

Radiobiología (radioquímica?)

Los efectos de las radiaciones ionizantes se suelen dividir en:

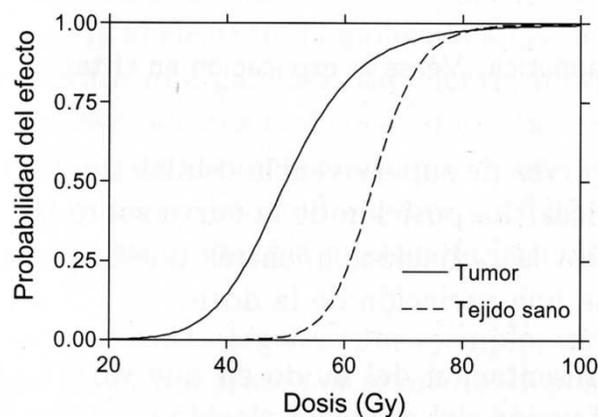
- Efectos directos: Como consecuencia de los procesos de ionización y/o excitación se produce la rotura de enlaces moleculares (i.e. ADN) dando lugar a dos radicales.
- Efectos indirectos: Los radicales normalmente provenientes de la radiólisis del agua se difunden y reaccionan con moléculas del citoplasma, dando lugar a un cambio químico posiblemente lesivo. El efecto indirecto predomina en radiaciones de bajo LET.



Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los tejidos producen efectos químicos como la radiólisis del agua

Radiobiología

- Los efectos de las interacciones de la radiación a nivel celular tienen un carácter estocástico o probabilístico.
- La energía absorbida en la célula no lo hace de un modo selectivo. La radiación no muestra preferencia por ninguna estructura celular en particular.
- Las lesiones sobre células, tejidos y órganos no son específicas de la radiación ionizante y pueden producirse por otras causas.
- En cualquier caso el efecto de las radiaciones ionizantes sobre las células es siempre lesivo (en mayor o en menor grado dependiendo de la dosis y el tipo de radiación).

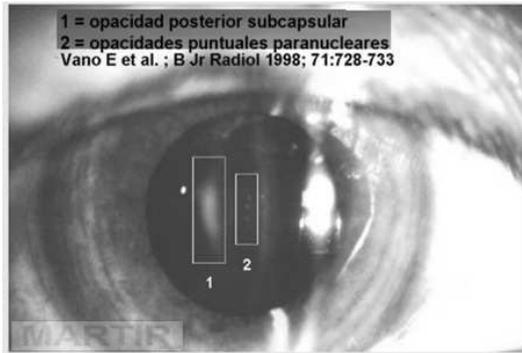


La relación entre dosis y probabilidad de respuesta o efecto en un tejido vivo sigue cierta relación o curva dosis-respuesta en muchos casos determinada experimentalmente. Esta curva muestra una probabilidad baja y pendiente pequeña a baja dosis. A dosis intermedias la probabilidad varía fuertemente con la dosis hasta alcanzar un valor de saturación a alta dosis.

Efectos de la radiación



Efecto determinista por exposición a una fuente radiactiva (accidente de Goiânia)



Lesión ocular por exposición a radiación típica de los radiólogos intervencionistas.

Los efectos, por tanto, se suelen separar en dos grandes grupos:

- a) Efectos aleatorios: son aquellos cuya probabilidad de incidencia (y no su gravedad) es función de la dosis. Dado el carácter estocástico de la deposición de energía y los efectos a nivel celular pueden ocurrir efectos importantes incluso a dosis bajas. Para estos efectos NO existe una dosis umbral.
- b) Efectos deterministas: como consecuencia de la irradiación de un tejido con una dosis alta se provoca la muerte de una cantidad de células que no pueden ser repuestas por la proliferación celular normal. Estos efectos provocan la disfunción de los órganos o tejidos de acuerdo a la dosis administrada siempre que se supere una dosis umbral. Por debajo de la dosis umbral no se manifiestan. (i.e. eritema de piel, umbral 0.3 a 1 Gy)

La protección radiológica tiene como objetivos:

- a) Prevenir los riesgos no probabilísticos por irradiación aguda
- b) Limitar los efectos probabilísticos tardíos de la radiación a niveles aceptables

La exposición a radiaciones ionizantes debe seguir el criterio ALARA ("As Low As Reasonably Achievable")

Ejemplos de efectos radiación

- Estocásticos

- **Cáncer**
- **Malformaciones y enfermedades hereditarias**
- **Tumores malignos**
- **Leucemias**

- Deterministas

- **Cataratas oculares**
- **Eritema**
- **Cáncer cutáneo**
- **Alteraciones hematológicas**
- **Aplasia medular**
- **Anemias**
- **Caída del cabello**
- **Inflamación bronquial**
- **Fibrosis pulmonar**
- **Neumonitis**
- **Esterilidad**

CUADRO HIPER-AGUDO (EFECTOS INMEDIATOS en minutos)

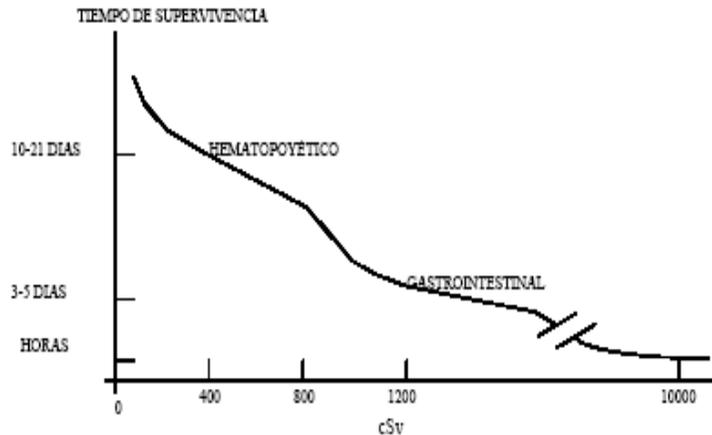
SÍNDROME DE IRRADIACIÓN:

Diarreas, Fiebres, Náuseas, Vómitos

Infecciones, Quemaduras con descamación seca o húmeda

Hemorragias intestinales

Radiobiología



Evolución de un síndrome de irradiación aguda en función del equivalente de dosis a cuerpo completo.

La radiosensibilidad es el grado o probabilidad de respuesta celular de acuerdo para una dosis de radiación ionizante fija. Ya desde 1906 se conocen las reglas básicas sobre radiosensibilidad de los organismos vivos. En general son más radiosensibles las células con las siguientes propiedades:

- mayor índice de reproducción celular.
- período de fase mitótica más largo.
- menor grado de diferenciación.

La radiosensibilidad de los tejidos del cuerpo humano depende de la radiosensibilidad de las células que los componen. Se suele clasificar en cinco categorías:

Alta: tejido linfóide, médula ósea, epitelios espermatozógenos, ovárico folicular e intestinal.

Media/Alta: faringe, epitelios de la epidermis, folículo piloso, vejiga urinaria, esófago, uretes, tejido gástrico y cristalino.

Media: sistema nervioso, tejido vascular fino y cartílago de crecimiento de los huesos.

Media/Baja: Cartílago maduro óseo, epitelio glandular mucoso y seroso de las glándulas salivares y sudoríparas, nasofaríngeo, hepático, pancreático, pituitario, tiroideo y adrenal.

Baja: Tejido muscular y neuronal.

Radiobiología

Los efectos de la radiación sobre las células inciden en daños letales o subletales dependiendo de la(s) moléculas afectadas. Como índice general podremos decir que (a efectos de dosis deterministas)

1 Gy (dosis baja) 1-10 Gy (dosis moderada) >10 Gy (dosis alta)

La radiosensibilidad depende de factores físicos, químicos y biológicos:

1. Físicos:

LET: cuanto mayor es el LET de las radiaciones mayor es el daño radiobiológico para una dosis dada.

Temperatura: normalmente un incremento de temperatura implica un incremento en el efecto de la dosis.

Fracconamiento: si la dosis se da fraccionada (o si se disminuye la tasa de dosis) el efecto es menor debido a los mecanismos de reparación a nivel celular.

2. Químicos:

La mayor oxigenación de los tejidos incrementa el efecto de la radiación sobre ellos (i.e. los tejidos tumorales hipóxicos son menos radiosensibles). Además hay sustancias químicas que reducen la radiosensibilidad (selenio?)

3. Biológicos:

Actividad mitótica: aquellas células con mayor actividad mitótica son mas radiosensibles

Grado de diferenciación: en un mismo tejido las células embrionarias o inmaduras son más sensibles a la radiación que las células diferenciadas.

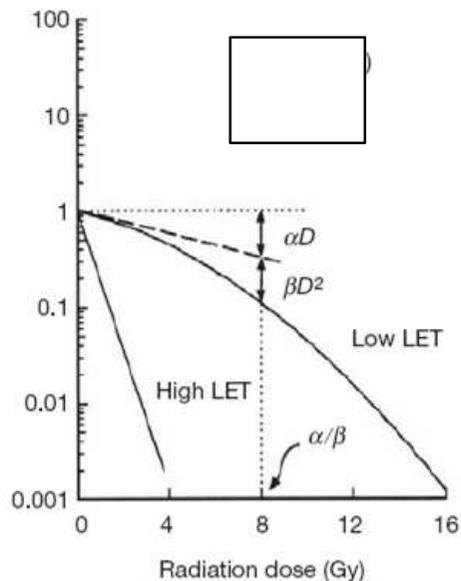
Vascularización: debido a la relación entre aporte de oxígeno y radiosensibilidad, cuanto más vascularizado esté el tejido, más radiosensible será.

Radiobiología

El modelo de supervivencia celular a una determinada dosis D más comúnmente usado es el llamado modelo "lineal-cuadrático"

$$S(D) = e^{-\alpha D - \beta D^2}$$

Donde $S(D)$ es la fracción de células que sobreviven a la dosis D ,
Alpha es una constante que describe la pendiente inicial de la curva de supervivencia y
Beta es una constante (normalmente menor) que describe la no linealidad en la exponencial de la curva de supervivencia.



Ejemplo de curva de supervivencia en el modelo lineal cuadrático alpha/beta nos da la dosis a la cual las componentes lineal y cuadrática se igualan.

Factor de calidad de radiación Q

La ICRP ha introducido la magnitud "equivalente de dosis" para medir el riesgo radiológico asociado a una determinada radiación ionizante. Se trata de una magnitud usada en la Protección Radiológica. El riesgo o daño sufrido por los tejidos vivos depende de la forma microscópica en la que se deposita la energía suceso a suceso. Es habitual asociar la eficiencia radiobiológica o daño a los tejidos al valor del poder de frenado másico no restringido L_{∞} .

Se define por tanto un factor Q de calidad adimensional de la radiación que es mayor cuanto mayor es la densidad de ionización producida por las partículas cargadas generadas en ese campo de radiación. Q es una función suave de L_{∞} .

$$Q = \frac{1}{D} \int_0^{L_{\max}} dL Q(L) D(L)$$

Q en un punto de un tejido es el promedio de los valores Q(L) de acuerdo con la distribución de dosis D(L) en función de la transferencia lineal de energía de las partículas cargadas primarias presentes en esa región del tejido. Se suelen excluir los electrones secundarios producidos por las ionizaciones de las partículas cargadas producidas por las interacciones del campo de radiación.

El factor de calidad Q ponderado depende no sólo de la radiación incidente sobre el cuerpo, sino también de su orientación relativa.

TABLA 1
Relaciones Q-L especificadas

Transferencia lineal de energía sin restringir L en agua (keV μm^{-1})	Q(L) ⁽¹⁾
< 10	1
10 - 100	0.32 L - 2.2
> 100	300/L

(1) Con L expresada en keV μm^{-1}

¹En informes anteriores ICRU (ICRU, 1980; 1986; 1988; 1992a) el símbolo \bar{Q} se asignó al valor de Q obtenido a partir de la ecuación (2). Ahora, el símbolo \bar{Q} se reserva para una aproximación de Q_T (véase 6.2.2).

Equivalente de Dosis

El equivalente de dosis H es el producto del factor de calidad ponderado Q en un punto de tejido y de la dosis D absorbida en ese punto.

$$\boxed{Q = \frac{1}{D} \int_0^{L_{\max}} dL Q(L) D(L)} \quad \Rightarrow \quad \boxed{H = Q D} \quad \text{Unidades: J kg}^{-1} \text{ sievert, Sv}$$

El equivalente de dosis H tiene las mismas dimensiones en unidades que la dosis en el SI (J kg⁻¹). Por otra parte se define la tasa de equivalente de dosis como

$$\boxed{\dot{H} = \frac{dH}{dt}; \text{ si } Q \text{ permanece constante } \dot{H} = Q \dot{D}} \quad \begin{array}{l} \text{Unidades: J kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \\ \text{Sievert por segundo, Sv s}^{-1} \end{array}$$

En base a la definición del factor Q ponderado y de H, también equivalentemente se puede definir el equivalente de dosis en un punto de un tejido

$$\boxed{H = \int_0^{L_{\max}} dL Q(L) D(L)}$$

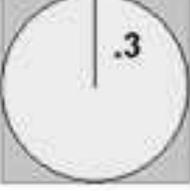
Siendo Q(L) el factor de calidad para partículas con transferencia lineal de energía L (tabulado) y D(L) la distribución diferencial de dosis en función de L (supuestamente medible).

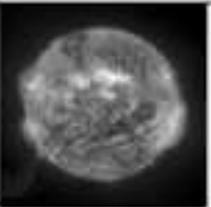
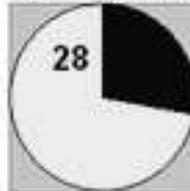
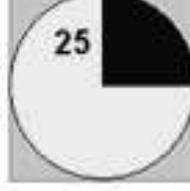
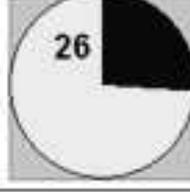
Equivalente de dosis

1. El establecimiento de la función $Q(L)$ es competencia de ICRP. El valor actual fue establecido en 1991.
2. En un punto de un órgano o tejido irradiado existen partículas con diferentes valores de L . Esto obliga a calcular un valor promedio de Q ponderado usando la función $Q(L)$ mediante los pesos obtenidos de $D(L)$.
3. H es una magnitud básica y de partida para otras magnitudes en radioprotección. Es función de punto y está basada en la actual definición de Q y depende del campo de radiación existente en el punto de interés.
4. H definida conjuntamente por ICRU e ICRP en 1962 sólo sirve para aplicaciones rutinarias de protección radiológica. No debe usarse para establecer los efectos de las radiaciones en caso de exposición accidental a un elevado nivel de dosis (ICRP 1977)
5. La antigua unidad de equivalente de dosis es el rem = 10^{-2} J/kg construida a partir de la unidad de dosis rad = 10^{-2} J/kg

Equivalente de dosis

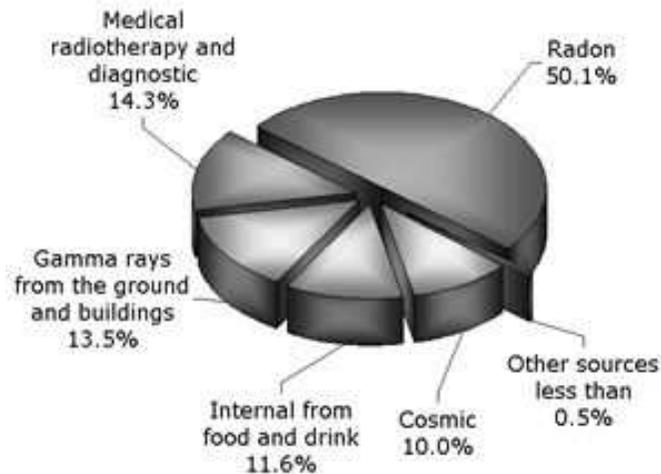
Es importante considerar algunos números promedio respecto a la exposición media a radiaciones ionizantes de una persona. La exposición de una persona a fuentes ambientales de radiación (sin incluir pruebas médicas ni transporte aéreo) es del orden de 3 mSv/año de los cuales hasta 2 mSv/año pueden ser debidos exclusivamente a Radón. (Fuente ANS)

Manmade Sources		Annual Dose (mrem/year)
	Medical (primarily from diagnostic X-rays)	 90
	Fallout from atomic bombs	 5
	Nuclear power production	 .3
	Consumer products (mostly from color TV sets)	 1

Natural Sources		Annual Dose (mrem/year)
	Cosmic rays (radiation from the sun and outer space)	 28
	Building materials	 4
	The human body	 25
	The earth	 26

Equivalente de dosis

	Equivalente de Dosis (Sv)
Dosis típica total de un tratamiento en radioterapia	60
Dosis límite anual a todo el cuerpo de un trabajador profesionalmente expuesto	0.02
Dosis anual media de fuentes de radiación naturales	0.002
Dosis media en un vuelo de avión de Inglaterra a España	0.00001



Las cifras en equivalente de dosis varían considerablemente de un individuo a otro dependiendo de condiciones ambientales y de trabajo (fuente NPL)

Symptoms frameworks

- **Symptoms of acute radiation** (dose received within one day):
 - 0 – 0.25 Sv (0 – 250 mSv): None
 - 0.25 – 1 Sv (250 – 1000 mSv): Some people feel nausea and loss of appetite; bone marrow, lymph nodes, spleen damaged.
 - 1 – 3 Sv (1000 – 3000 mSv): Mild to severe nausea, loss of appetite, infection; more severe bone marrow, lymph node, spleen damage; recovery probable, not assured.
 - 3 – 6 Sv (3000 – 6000 mSv): Severe nausea, loss of appetite; hemorrhaging, infection, diarrhea, peeling of skin, sterility; death if untreated.
 - 6 – 10 Sv (6000 – 10000 mSv): Above symptoms plus central nervous system impairment; death expected.
 - Above 10 Sv (10000 mSv): Incapacitation and death.
- **Dose examples**
 - Dental radiography: 0.005 mSv
 - Mammogram — Single Exposure, Equipment Mean: 2 mSv
 - Mammogram — Procedural Mean, Equipment Variation: 4 mSv - 5 mSv
 - Brain CT scan: 0.8–5 mSv
 - Chest CT scan: 6–18 mSv
 - Gastrointestinal series X-ray investigation: 14 mSv
 - International Commission on Radiological Protection recommended limit for volunteers averting major nuclear escalation: 500 mSv
 - International Commission on Radiological Protection recommended limit for volunteers rescuing lives or preventing serious injuries: 1000 mSv[10]
- **Hourly dose examples**
 - Average individual background radiation dose: 0.23 μ Sv/h (0.00023mSv/h); 0.17 μ Sv/h for Australians, 0.34 μ Sv/h for Americans
 - Highest reported level during Fukushima accident: 1000 mSv/h reported as the level at a pool of water in the turbine room of reactor two.

- **Yearly dose examples**

- Maximum acceptable dose for the public from any man made facility: 1 mSv/year
- Dose from living near a nuclear power station: 0.0001–0.01 mSv/year
- Dose from living near a coal-fired power station: 0.0003 mSv/year
- Dose from sleeping next to a human for 8 hours every night: 0.02 mSv/yr
- Dose from cosmic radiation (from sky) at sea level: 0.24 mSv/year
- Dose from terrestrial radiation (from ground): 0.28 mSv/year
- Dose from natural radiation in the human body: 0.40 mSv/year
- Dose from standing in front of the granite of the United States Capitol building: 0.85 mSv/year
- Average individual background radiation dose: 2 mSv/year; 1.5 mSv/year for Australians, 3.0 mSv/year for Americans
- Dose from atmospheric sources (mostly radon): 2 mSv/year
- Total average radiation dose for Americans: 6.2 mSv/year
- New York-Tokyo flights for airline crew: 9 mSv/year
- Dose from smoking 30 cigarettes a day: 13-60 mSv/year
- Current average dose limit for nuclear workers: 20 mSv/year
- Dose from background radiation in parts of Iran, India and Europe: 50 mSv/year
- Dose limit applied to workers during Fukushima emergency: 250 mSv/year

- **Dose limit examples**

- Criterion for relocation after Chernobyl disaster: 350 mSv/lifetime
- In most countries the current maximum permissible dose to radiation workers is 20 mSv per year averaged over five years, with a maximum of 50 mSv in any one year.
- This is over and above background exposure, and excludes medical exposure. The value originates from the International Commission on Radiological Protection (ICRP), and is coupled with the requirement to keep exposure as low as reasonably achievable (ALARA) – taking into account social and economic factors.
- Public dose limits for exposure from uranium mining or nuclear plants are usually set at 1 mSv/yr above background.

Equivalente de dosis

Mapa de tasa de exposición por radiación gamma de origen natural en la península ibérica (Fuente CSN)



Debido a que aproximadamente 1 Roentgen de exposición produce una dosis de 1 rad en tejido blando, se suele tomar aproximadamente la equivalencia de 100 R de la magnitud exposición a un equivalente de dosis de 1 Sv.

Equivalente de dosis

Probabilidad de inducción de enfermedad grave o muerte según actividades o exposición a riesgo

Actividad	Probabilidad estimada
Gripe (todas las edades)	1/5000
Exposición a 10 mSv cuerpo completo	1/10000

Los límites de dosis se establecen por tanto sobre una estimación del riesgo asociado a estas dosis. Es, por tanto, considerada segura una actividad cuyo riesgo de muerte o enfermedad grave es inferior a 10^{-4} . Podremos establecer de modo ilustrativo la relación entre equivalente de dosis y riesgo

$$\text{Prob} \approx 10^{-5} \times H(\text{mSv})$$

Equivalente de dosis: magnitudes medias

En la práctica de la protección radiológica los efectos de la radiación dependen de los órganos implicados ya que hay órganos especialmente radiosensibles (i.e. cristalino). Además es a menudo suficiente y útil manejar valores medios del equivalente de dosis y del factor de calidad de radiación. Por ello es normal definir la dosis absorbida media en un órgano como

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \, dm$$

Dosis absorbida media en órgano

Siendo m_T la masa del tejido u órgano y D la dosis absorbida en el elemento de masa dm . La magnitud D_T tiene sentido sobre todo si la variación espacial de la dosis D en el órgano o tejido no es muy marcada. A esta dosis media se denomina a veces dosis en órgano.

Se define análogamente el factor de calidad medio Q_T en órgano T como

$$Q_T = \frac{1}{m_T D_T} \int_{m_T} Q D \, dm$$

Donde Q es el factor ponderado de calidad de radiación en cada punto del órgano, por tanto

$$Q_T = \frac{1}{m_T D_T} \iint_{m_T L} Q(L) D(L) \, dL \, dm$$

En muchos casos el espectro de energía de la radiación en el punto de interés no es bien conocido, por lo que se suele aproximar por un factor de calidad medio convencional \bar{Q}

Equivalente de dosis: magnitudes medias

El equivalente de dosis medio H_T en un tejido o en un órgano dado T se puede obtener como el producto de la dosis media en el órgano por el factor medio de calidad

$$H_T = Q_T D_T = \frac{1}{m_T} \int \int_{m_T L} Q(L) D(L) dL dm$$

Las magnitudes Q_T , D_T y H_T no son funciones de punto ya que se refieren a valores medios calculados en un órgano o tejido T.

En la práctica la magnitud H_T se puede determinar mediante cálculo para una orientación dada de un maniquí antropomórfico a partir de la magnitud $D(L)$ distribución de dosis absorbida debida a radiación respecto al LET L y del factor de calidad $Q(L)$.



Maniquí antropomórfico y alojamientos perforados para la medida de dosis mediante TLD.

Equivalente de dosis efectiva

El equivalente de dosis efectiva H_E se estableció como magnitud limitadora de dosis por el ICRP en 1977. El equivalente de dosis efectiva se define como la suma sobre los órganos (o tejidos) T del organismo del producto $Q_T D_T$ multiplicado por un factor ponderal del tejido en cuestión w_T .

$$H_E = \sum_T w_T Q_T D_T \quad \text{con} \quad 1 = \sum_T w_T$$

Los factores w_T se eligieron de modo que una dosis uniforme sobre todo el cuerpo dan lugar a un equivalente de dosis efectiva igual al correspondiente equivalente de dosis uniforme. En la práctica la dificultad de determinar $D(L)$ lleva al uso de un factor de calidad medio de modo que la anterior ecuación se convierte en

$$H_E = \bar{Q} \sum_T w_T D_T$$

Equivalente de dosis media y efectiva

Factores ponderales de tejido	
Teido u órgano	Factor wT
Gónadas	0.20
Médula Ósea (roja)	0.12
Colon	0.12
Pulmón	0.12
Estómago	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

$$H_T = Q_T D_T$$

$$H_E = \sum_T w_T Q_T D_T$$

- A las magnitudes H_T y H_E se las conoce como magnitudes limitadoras.
- Estas magnitudes se definen a partir de valores medios sobre dosis en órganos.
- Son imposibles de medir en la práctica para una persona real (habría que introducir detectores en sus órganos). Se determinan equivalentemente en maniqués antropomórficos.
- En lugar de estas magnitudes limitadoras se usan las magnitudes operacionales que sí se pueden medir en la práctica y están relacionadas con las anteriores.

Dose equivalent

The equivalent dose to a tissue is found by multiplying the absorbed dose, in gray, by a weighting factor (W_R). The relation between absorbed dose D and equivalent dose H is thus:

$$H = W_R \cdot D.$$

The weighting factor (sometimes referred to as a quality factor) is determined by the radiation type and energy range.^[1]

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

where

H_T is the equivalent dose absorbed by tissue T

$D_{T,R}$ is the absorbed dose in tissue T by radiation type R

W_R is the weighting factor defined by the following table

Radiation type and energy		W_R
electrons, muons, photons (all energies)		1
protons and charged pions		2
alpha particles, fission fragments, heavy ions		20
neutrons (function of linear energy transfer L in keV/ μ m)	$L < 10$	1
	$10 \leq L \leq 100$	$0.32 \cdot L - 2.2$
	$L > 100$	$300 / \text{sqrt}(L)$

Thus for example, an absorbed dose of 1 Gy by alpha particles will lead to an equivalent dose of 20 Sv. The maximum weight of 30 is obtained for neutrons with $L = 100$ keV/ μ m.

The *effective dose* of radiation (E), absorbed by a person is obtained by averaging over all irradiated tissues with weighting factors adding up to 1

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

Tissue type	W_T (each)	W_T (group)
Bone marrow, colon, lung, stomach, breast, remaining tissues	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, oesophagus, liver, thyroid	0.04	0.16
Bone surface, brain, salivary glands, skin	0.01	0.04
total		1.00

For other organisms, weighting factors have been defined, relative to the effect on humans:^[2]

Organism	relative weight
Viruses, bacteria, protozoans	0.03 – 0.0003
Insects	0.1 – 0.002
Molluscs	0.06 – 0.006
Plants	2 – 0.02
Fish	0.75 – 0.03
Amphibians	0.4 – 0.14
Reptiles	1 – 0.075
Birds	0.6 – 0.15

History

Historically, the weighting factors for radiation type and tissue type were separated out as Q and N respectively. In 2002, the CIPM decided that the distinction between Q and N caused too much confusion and therefore deleted the factor N from the definition of absorbed dose in the SI brochure.^[22]

The older version of the definitions contained Q and N factors, corresponding to the current W_R and W_T , with values:

Radiation type and energy	Q
electrons, positrons, muons, or photons (gamma, X-ray)	1
neutrons < 10 keV	5
neutrons 10–100 keV	10
neutrons 100 keV – 2 MeV	20
neutrons 2 MeV – 20 MeV	10
neutrons >20 MeV	5
protons other than recoil protons and energy >2 MeV	2
alpha particles, fission fragments, nonrelativistic heavy nuclei	20

Tissue type	N (each)	N (group)
bone surface, skin	0.01	0.02
bladder, breast, liver, esophagus, thyroid, other	0.05	0.30
bone marrow, colon, lung, stomach	0.12	0.48

Equivalente de dosis efectiva

Tabla de dosis efectiva H_E por pruebas de diagnóstico

Procedimiento diagnóstico	Dosis efectiva típica (mSv)	No. Equivalente de radiografías de tórax	Período equivalente de radiación natural de fondo
Tórax (película PA simple)	0.02	1	3 días
Abdomen	1.0	50	6 meses
Enema de Bario	7.0	350	3.2 años
TAC de cabeza	2.3	115	1 año
TAC de tórax	8	400	3.6 años
TAC de abdomen/pelvis	10	500	4.5 años

Media de radiación de fondo en el Reino Unido = 2.2 mSv /año.
Las medias regionales van desde 1.5 hasta 7.5 mSv/año

Dosis equivalente en órgano

La dosis equivalente en órgano se introduce por la ICRP en 1991 (ICRP 60). El valor de la dosis equivalente en un órgano T sometido a una radiación R viene dada por

$$H_{T,R} = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Los factores w_R se encuentran en la ICRP 60 y representan un resumen de los efectos radiobiológicos asociados a la exposición a la radiación. Estos factores juegan un papel análogo al Q medio definido anteriormente. Estos factores en el caso de radiación externa se refieren al campo de radiación incidente y no tienen en cuenta la modificación del campo de radiación por la presencia del cuerpo humano.

Factores ponderales de radiación	
Tipo e intervalo de energía	Factor ponderal w_R
Fotones (todas las energías)	1
Electrones y muones (todas las energías)	1
Neutrones $E < 10$ keV	5
Neutrones 10 keV $< E < 100$ keV	10
Neutrones 100 keV $< E < 2$ MeV	20
Neutrones 2 MeV $< E < 20$ MeV	10
Neutrones 20 MeV $< E$	5
Protones (no de retroceso) $E > 2$ MeV	5
Partículas alpha, fragmentos de fisión y núcleos pesados	20

Para un campo de radiación con dos componentes, podremos escribir

$$H_T = \left[w_1 \frac{D_{T1}}{D_T} + w_2 \frac{D_{T2}}{D_T} \right] D_T$$

N.B. En una medida directa de dosis no puede normalmente separarse las componentes de radiación por tanto w_R se considera una aproximación al problema del cálculo de la dosis equivalente. Esta situación puede dar lugar a ambigüedades.

Dosis efectiva

La dosis equivalente en órgano es un indicador del riesgo derivado por la irradiación de un cierto tejido corporal, la dosis efectiva es la suma ponderada de las dosis equivalentes en los diferentes órganos

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Esta ecuación también suele ser escrita en términos de contribuciones ponderales por tejido, de modo que se expresa

$$E = \sum_T w_T D_T \sum_R w_R \frac{D_{T,R}}{D_T}$$

Antiguas y nuevas magnitudes limitadoras ICRP

Equivalente de dosis en órgano

$$H_T = Q_T D_T = \frac{1}{m_t} \int_{m_t} \int_L Q(L) D_L dL dm$$

antiguo: $Q(L)$ in ICRP Pub. 26 (1977)

nuevo: $Q(L)$ in ICRP Pub. 60 (1991)

Equivalente de dosis efectiva

$$H_E = \sum_T w_T Q_T D_T$$

antiguo: w_T , factores ponderales de tejido
ICRP Pub. 26 (1977)

nuevo: w_T , factores ponderales de tejido
ICRP Pub. 60 (1991)

Dosis equivalente en órgano

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

w_R , factores ponderales de radiación
ICRP Pub. 60 (1991)

Dosis efectiva

$$E = \sum_T w_T H_T$$

$$E = \sum_T w_T D_T \sum_R \frac{D_{T,R}}{D_T} w_R$$

w_T , factores ponderales de tejido
ICRP Pub. 60 (1991).

Las magnitudes limitadoras H_T y E no dependen del factor de calidad Q , sino que se obtienen a través del factor ponderal de tejido w_R . Esta definición y los símbolos usados siguen las recomendaciones de la ICRP.

Magnitudes operacionales

La definición de magnitudes operacionales en radioprotección de haces externos persigue establecer magnitudes que sean fáciles de medir en la práctica y que permitan establecer los valores de las magnitudes limitadoras H_T y E .

Vigilancia de área:

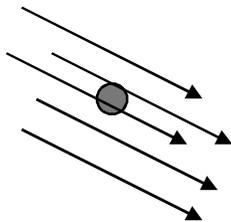
Equivalente de dosis ambiental $H^*(d)$

Equivalente de dosis direccional $H'(d, \Omega)$

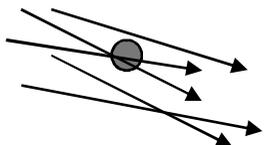
Vigilancia individual:

Equivalente de dosis personal $H_p(d)$

Para definir las magnitudes operacionales se usa un maniquí que aproxima el comportamiento de la radiación en el cuerpo humano. Este maniquí es esférico y es conocido popularmente como la esfera ICRU. (ICRU 1980) Esfera de 30 cm de diámetro que emula el tejido blando del cuerpo humano con densidad 1 g/cm³ composición en masa 76.2% O 11.1% C 10.1% H 2.6% N.



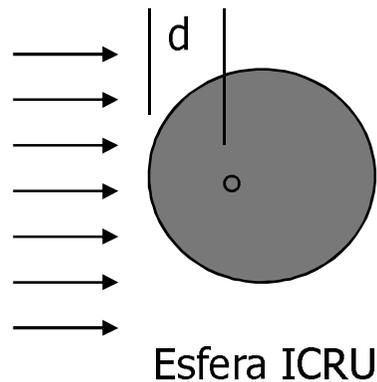
Campo expandido: debido a que el volumen activo de los dosímetros suele ser pequeño en relación con el volumen del cuerpo humano, se define el campo de radiación expandido como aquel cuya fluencia y distribución angular es homogénea en todo el volumen de interés e igual al de un punto de referencia (el dosímetro).



Campo alineado: se suele requerir que los dosímetros tengan respuestas isotrópicas. Sin embargo el equivalente de dosis en un punto de un cuerpo extenso depende de la dirección de incidencia de la radiación. Se define el campo alineado como aquel cuya fluencia y distribución de energía es igual al campo de radiación original pero toda la radiación incidente proviene de la misma dirección.

Equivalente de dosis ambiental

El equivalente de dosis ambiental $H^*(d)$ en un punto de un campo de radiación es el equivalente de dosis que se produciría por el correspondiente campo alineado en la esfera ICRU a una profundidad d en la dirección de incidencia.



El equivalente de dosis ambiental depende fuertemente de la posición en la esfera y pretende emular el efecto de la radiación en el cuerpo en función de la profundidad. Se puede definir también la dosis absorbida ambiental en este punto $D^*(d)$.

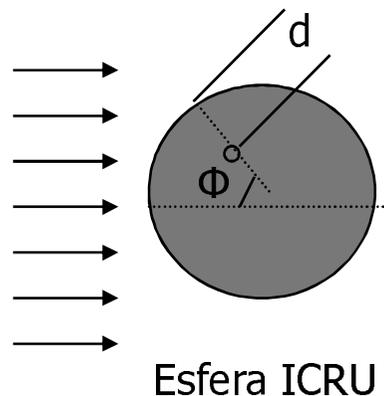
Para radiación fuertemente penetrante se recomienda una profundidad de 10 mm que se expresa como $H^*(10)$.

Para radiación débilmente penetrante se suele considerar 0.07 mm para la piel y 3 mm para el cristalino, que se notan $H^*(0.07)$ y $H^*(3)$ respectivamente.

Equivalente de dosis direccional

El equivalente de dosis direccional $H'(d,\Omega)$ en un punto de un campo de radiación es el equivalente de dosis que se produciría por el correspondiente campo expandido en la esfera ICRU a una profundidad d en una dirección especificada por Ω . Se puede definir análogamente la dosis absorbida direccional $D'(d,\Omega)$.

Normalmente la dirección Ω , vendrá dada por dos ángulos (azimut y polar). La profundidad d deberá expresarse en mm. Para radiación débilmente penetrante se recomienda 0.07 mm para la piel y 3 mm para el cristalino, $H'(0.07,\Omega)$ y $H'(3,\Omega)$ respectivamente. Para radiación fuertemente penetrante se suele usar $H'(10,\Omega)$.



En el caso particular de un campo de radiación unidireccional, la dirección se podrá especificar mediante un solo ángulo Φ que corresponde al ángulo entre la dirección de la radiación y el radio de la esfera ICRU. En el caso de considerar $\Phi=0$, se verificará que

$$H'(d,0) = H'(d) = H^*(d)$$

Equivalente de dosis personal

El equivalente de dosis personal $H_p(d)$ es el equivalente de dosis en tejido blando a una profundidad d especificada en el cuerpo humano. Equivalentemente se puede definir la dosis personal $D_p(d)$ como la dosis impartida en tejido blando a esta profundidad.

De nuevo, para radiación débilmente penetrante se emplea una profundidad de 0.07 mm para la piel y de 3 mm para el cristalino, equivalentes de dosis personal que se expresan como $H_p(0.07)$ y $H_p(3)$ respectivamente. Para radiación fuertemente penetrante se recomienda una profundidad de 10 mm, lo cual se expresa como $H_p(10)$.

La medida del equivalente de dosis personal se realiza normalmente mediante un dosímetro situado en la superficie del cuerpo y recubierto mediante un material equivalente a tejido del espesor nominal correspondiente.



Organismos competentes

Organismos internacionales:

ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica)

nació en 1.928 bajo los auspicios del Congreso Internacional de Radiología:

- elaborar las reglas de protección en radiología
- otras utilizaciones de las radiaciones (ionizantes y no ionizantes) y sustancias radiactivas

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

El UNSCEAR nació de la inquietud de la Asamblea General de las Naciones Unidas ante los problemas que se planteaban en los años 1.950-55, como consecuencia del mayor uso y exposición a radiaciones ionizantes. Creado en 1955 por la Asamblea General

- evalúa los niveles de radiactividad y los riesgos para el hombre

ICRU La Comisión Internacional de Unidades Radiológicas

- define los conceptos y las unidades necesarias en Protección Radiológica

OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) (IAEA)

se forma el 29 de julio de 1.957 como una organización internacional gubernamental autónoma, bajo los auspicios de las Naciones Unidas (con sede en Viena). Su principal objetivo es "acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en todo el mundo". En 1998 la OIEA contaba con 128 estados miembros.

- establece protocolos de dosimetría
- reglamentos de uso de sustancias radiactivas y generadores de radiación
- base de datos nucleares

Organismos competentes

Organismos nacionales:

CIEMAT:

En España, en 1.951 se crea la Junta de Energía Nuclear (J.E.N.) como Centro Nacional de Investigación dependiente del Ministerio de Industria, siendo el organismo encargado de los problemas de seguridad y protección contra las radiaciones ionizantes. La JEN se transforma en el CIEMAT, organismo de investigación y desarrollo tecnológico dirigido, especialmente, a la formación de personal científico y técnico.

- Sede del laboratorio nacional de metrología de radiaciones ionizantes.

CSN (Consejo de Seguridad Nuclear)

En 1.979, debido al desarrollo de la aplicación de la energía nuclear y la complejidad de su control, se consideró oportuno separar las funciones de promoción y de control y se creó el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) Ley 15/1980, como ente público independiente de la Administración del Estado (dependiente solo del Parlamento) con la misión de evaluar y controlar el diseño, construcción y operación de las instalaciones nucleares y radiactivas.

- Emitir informes ***preceptivos*** previos a las autorizaciones de Industria. Vinculantes si son negativos
- Realizar inspecciones en las instalaciones
- Conceder Licencias / Acreditaciones
- Proponer sanciones
- Asesorar a los tribunales y órganos de la Administración

Aspectos legales de Protección Radiológica

De acuerdo a las recomendaciones del ICRP, en España el CSN ha desarrollado una serie de normas respecto al uso de las radiaciones ionizantes recogidas en la siguiente legislación:

- R.D. 1891/1991, de 30/12 sobre instalación y utilización de aparatos de RX con fines de diagnóstico médico.
- R.D. 1836/1999, de 3/12 por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas.
- R.D. 1976/1999, de 23/12 por el que se establecen los criterios de calidad en radiodiagnóstico.
- R.D. 783/2001, de 6/7 por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. Recoge las recomendaciones de ICRP 60.

En esta normativa se establecen los procedimientos de autorización y de funcionamiento de instalaciones radiactivas. Asimismo se establecen las prescripciones sobre límites de dosis que pueden recibir los profesionales y el público debido al uso de radiaciones ionizantes.

Límites de dosis

Los límites en dosis excluyen la dosis por radiación ambiental y pruebas médicas.

Se distinguen tres tipos de personas:

Trabajador Expuesto: aquel que por la naturaleza de su trabajo puede recibir $E > 1\text{mSv}$

Estudiantes: personal en formación que debe usar fuentes radiactivas

Público: cualquier persona no vinculada a la práctica o uso de radiaciones ionizantes

NB (a los pacientes no se les aplican estos límites).

Dosis Efectiva (E):

Trabajador profesionalmente expuesto: 100 mSv en 5 años (20 mSv / año)
(ningún año oficial podrá ser la dosis efectiva superior a 50 mSv)

Mujer embarazada (feto): 1 mSv

Personal en formación y estudiantes:
> 18 años 100 mSv en 5 años (20 mSv / año)
18 años > E > 16 años 6 mSv / año

Público: 1 mSv / año

Dosis Equivalente (H_T):

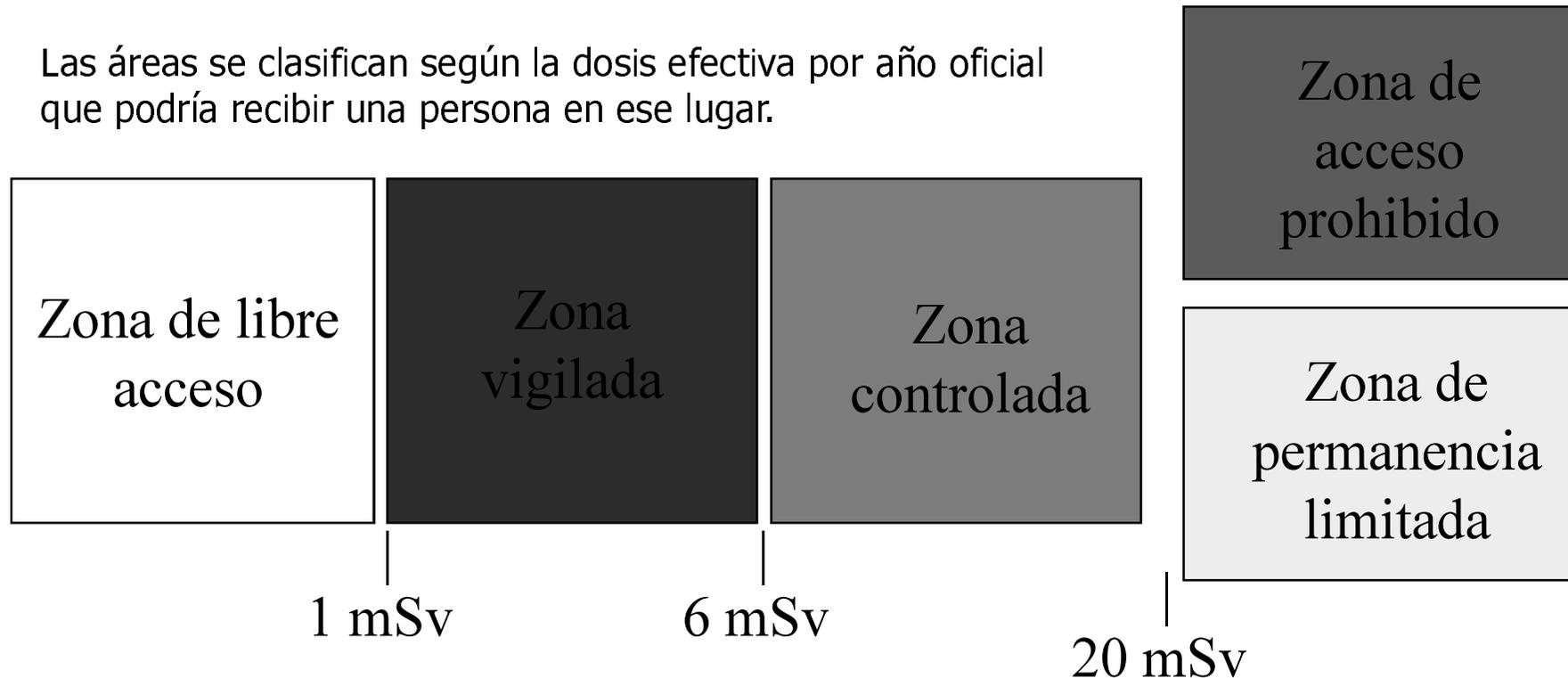
Trabajador profesionalmente expuesto:
Cristalino 150 mSv / año
Piel 500 mSv / año
Manos y pies 500 mSv / año

Personal en formación y estudiantes:
Cristalino 50 mSv / año
Piel 150 mSv / año
Manos y pies 150 mSv / año

Público:
Cristalino 15 mSv / año
Piel 50 mSv / año

Clasificación de áreas

Las áreas se clasifican según la dosis efectiva por año oficial que podría recibir una persona en ese lugar.



No es obligatorio el dosímetro personal si hay dosimetría de área (gris)



Obligatorio dosímetro personal (verde)



Obligatorio dosímetro personal (amarillo)

Protección Radiológica: factores externos

Existen tres factores básicos que permiten reducir o controlar la dosis recibida por la exposición a radiaciones ionizantes:

Tiempo: la dosis recibida es proporcional al tiempo de exposición en el campo de radiación.

Distancia: para fuentes radiactivas de pequeño tamaño esperamos una reducción con el cuadrado de la distancia.

Barrera o blindaje: uso de un material que absorbe de modo eficiente las radiaciones, interpuesto entre la fuente y el individuo. (Plomo, hierro, hormigón, etc)

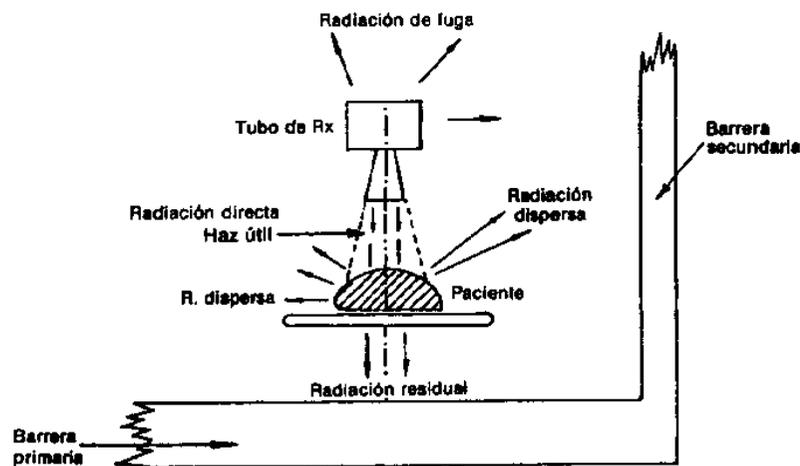


Figura 5.6. Tipos de radiaciones.

Video de vidrio plomado

Barrera primaria: aquella que se usa para reducir la exposición al haz directo o útil por debajo de un valor preestablecido.

Barrera secundaria: es la que reduce la exposición de la radiación secundaria o parásita (radiación de fuga más radiación dispersa) a valores por debajo de un límite establecido.



Protección Radiológica: barrera primaria

Consideraremos en primer lugar el cálculo de una barrera primaria. Si se trata de un tubo de rayos X o de un acelerador de electrones de radioterapia, podremos en general hablar de dosis en Gy o bien de equivalente de dosis en Sv (factor de calidad 1).

En principio el objetivo del cálculo es el de obtener la atenuación A que es necesario alcanzar en la barrera para reducir la dosis o equivalente de dosis a un valor prefijado. Los valores de límite de dosis expresados anteriormente los denotaremos como H_L .

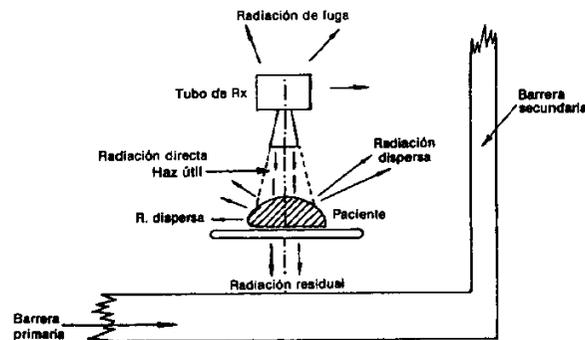


Figura 5.6. Tipos de radiaciones.

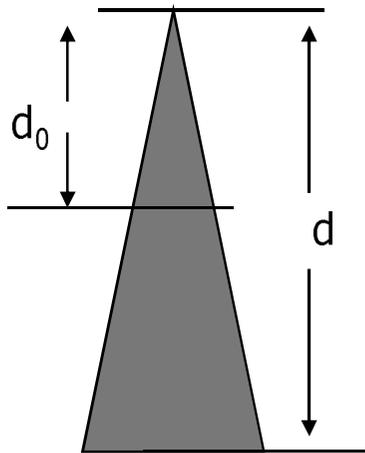
Carga de trabajo: corresponde a la dosis impartida por la fuente de radiación debida al haz útil a una distancia de referencia d_0 (normalmente el isocentro). Se denota mediante W_0 . Esta carga de trabajo indica la fracción de uso de la fuente y no se refiere a la tasa de dosis cuando está funcionando. En el caso de tubos de RX suele darse en mA min por semana.

Ejemplo: Un acelerador lineal trabajando a 25 MV se usa para tratar unos 80 pacientes al día. Si la dosis media por paciente es de 2.5 Gy en el isocentro (1 m del foco) calcular W_0

$$W_0 = 2.5 \frac{\text{Gy}}{\text{pac}} \times 80 \frac{\text{pac}}{\text{d}} \times 5 \frac{\text{d}}{\text{sem}} \times 50 \frac{\text{sem}}{\text{año}} = 5 \cdot 10^4 \text{ Gy} / \text{año} = 5 \cdot 10^4 \text{ Sv} / \text{año}$$

Protección Radiológica: barrera primaria

Se considera que la dosis en un punto situado a una distancia d del foco (en el haz primario) recibe una fracción $(d_0/d)^2$ de la dosis en el punto de referencia (isocentro).



La NCRP (American National Commission on Radiation Protection) recomendó el uso de una serie de factores para el cálculo de barreras en su report NCRP-49

El factor de uso (U) es la fracción de tiempo que el irradiador apunta en la dirección donde se va a colocar la barrera primaria. Ya que los tubos de RX y los aceleradores giran en los tratamientos y en ciertas técnicas, no están permanentemente apuntando a la barrera primaria durante toda la carga de trabajo W_0 .

$U = 1$ para los suelos, puertas, techos y paredes hacia las cuales puede dirigirse el haz útil.

$U = 1/4$ para puertas y paredes no expuestas corrientemente al haz útil.

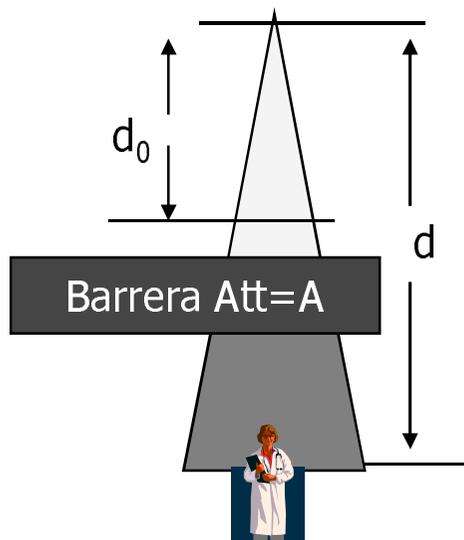
$U = 1/16$ para los techos no expuestos corrientemente al haz útil, y suelos de las instalaciones dentales.

Protección Radiológica: barrera primaria

Factor de ocupación (T): es la fracción de tiempo que permanecen los individuos en el lugar a proteger y que está siendo objeto de cálculo.

- T= 1 para la ocupación permanente.
- T= 1/4 para la ocupación parcial.
- T= 1/16 para la ocupación ocasional.

Si A es la atenuación de la barrera primaria, se obtiene que



$$\text{Dosis por año a personal} = W_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \frac{U \cdot T}{A}$$

Si consideramos que esta dosis debe corresponder a un límite de dosis H_L , podemos obtener A.

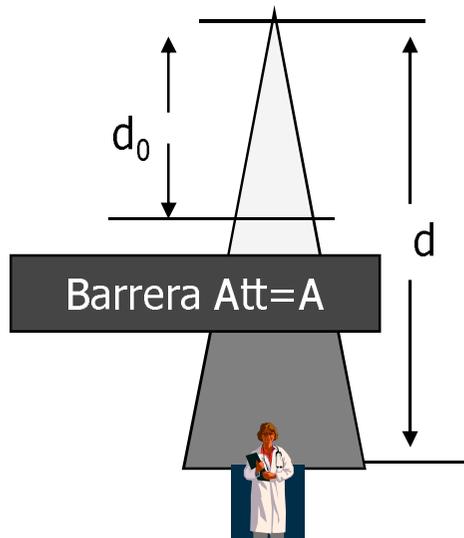
Espesor de reducción a 1/10 (TVL) en metros

Material	Co-60	5 MV	10 MV	25 MV
Tierra 1600 kg/m ³	0.34	0.48	0.57	0.74
Hormigón 2400 kg/m ³	0.23	0.32	0.38	0.50
Plomo	0.042	0.047	0.052	0.051

$$A = W_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \frac{U \cdot T}{H_L}$$

Protección Radiológica: barrera primaria

Consideremos el ejemplo anterior de un acelerador a 25 MV y una carga de trabajo de 5×10^4 Sv/año. Si consideramos una pared con $U=1/4$ y tiempo de ocupación $T=1$ daremos como límite anual de dosis 5 mSv. La distancia de la consola de control del acelerador (donde están los técnicos) al foco del acelerador son 6 m.



$$A = W_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \frac{U \cdot T}{H_L} = 5 \cdot 10^4 \left(\frac{1}{6} \right)^2 \frac{0.25 \cdot 1}{5 \cdot 10^{-3}} = 7 \cdot 10^4$$

Si la pared va a ser realizada en hormigón, podemos tomar el valor del TVL (0.5 m) de la tabla anterior para 25 MV. El espesor de pared necesario en esta instalación será

$$A = 10^{\frac{\Delta L}{TVL}} \Rightarrow \Delta L = TVL \times \log_{10}(A)$$

En este caso obtendremos que el espesor necesario es de 2.4 m (bastante grueso!) de hormigón convencional. Se suele usar hormigón baritado para reducir el espesor ya que éste último tiene mayor densidad.

Protección Radiológica: barrera secundaria

Normalmente cuando se realiza una irradiación externa la primera fuente de radiación dispersa es el propio objeto irradiado (paciente). Además de ello la fuente de radiación (el cabezal del acelerador, del tubo RX o del cobalto) tienen una cierta radiación de fuga a través de los elementos de blindaje.

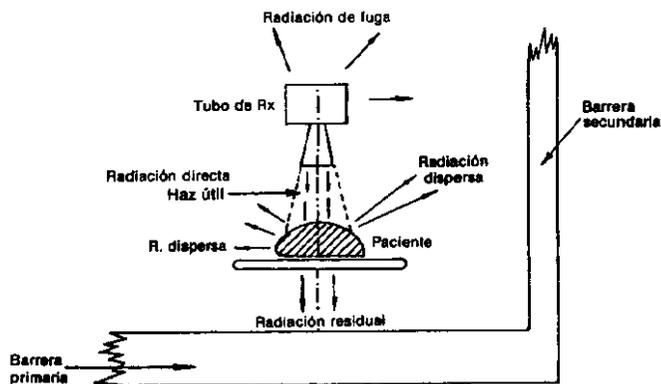


Figura 5.6. Tipos de radiaciones.

En el caso de un tubo de RX, su carcasa deberá garantizar que la dosis de fuga no es superior a 1mGy/h en cualquier punto situado a 1m de éste cuando funciona al máximo kilovoltaje y corriente.

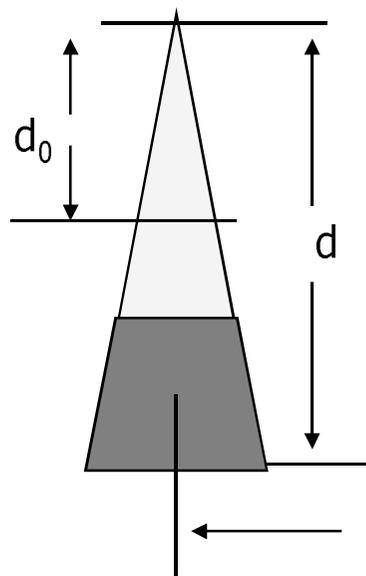
Para aceleradores se suele garantizar una tasa de dosis inferior al 0.1% de la tasa primaria a 1m del isocentro del acelerador. Para un cobalto la fuga debe ser menor de 0.02 mSv/h a 1 m del cabezal.

Además de la radiación de fuga de la máquina, cuando el haz incide sobre algún objeto (i.e. la barrera primaria) se produce radiación dispersa. Aunque evidentemente esta radiación dispersa depende de múltiples factores (espectro de energía del haz, material del objeto, tamaño de campo, ángulo de dispersión), siguiendo la NCRP-49 se suele considerar que la radiación dispersa por el objeto a 90° y a 1m de distancia es del orden de 0.1%.

Protección Radiológica: barrera secundaria

Consideremos el ejemplo anterior de un acelerador a 25 MV y una carga de trabajo de 5×10^4 Sv/año. Consideramos una pared con $U=1/4$ y tiempo de ocupación $T=1/4$. En este caso, los pacientes de la sala de espera están situados a 4 m del isocentro.

Daremos como límite anual de dosis 1 mSv. El factor a es el factor de scatter y S es al area en cm^2 ($S=400$ campo $20\text{cm} \times 20\text{cm}$).

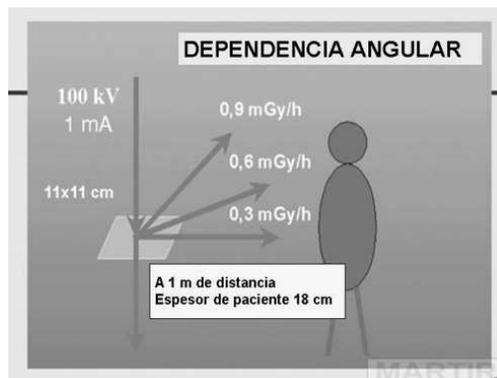


$$A = W_0 \times 10^{-3} \left(\frac{d_0}{d_s \cdot d} \right)^2 \frac{U \cdot T \cdot S}{400 \cdot H_L} = 50 \left(\frac{1}{4} \right)^2 \frac{0.25 \cdot 0.25}{1 \cdot 10^{-3}} \approx 200$$



Barrera secundaria

Si la pared va a ser realizada en hormigón, podemos tomar el valor del TVL (0.5 m) de la tabla anterior para 25 MV. El espesor de pared necesario en esta pared será de 1.15 m



A este cálculo de barrera habría que añadir la contribución de radiación dispersa de las paredes de la sala u otros objetos. En la imagen se muestran valores orientativos para RX.

EJEMPLO 1:

Un trabajador que haya recibido el vigente límite anual de dosis para trabajadores expuestos (50 mSv) cada año de su vida laboral (47 años), habrá acumulado una dosis de $47 \times 50 = 2350 \text{ mSv} = 2.35 \text{ Sv}$. Multiplicando este valor por el detrimento de desarrollar un cáncer mortal para trabajadores ($4 \times 10^{-2} = 0.04 \text{ Sv}^{-1}$) resulta un riesgo o probabilidad de que la causa de la muerte de la persona sea un cáncer mortal debido a su exposición a las radiaciones ionizantes de $0.094 = 9.4\%$. La probabilidad de aparición del mismo cáncer por otras causas es de un 35% debido a la alimentación, un 30% debido al tabaco, un 7% debido a prácticas sexuales, un 3% debido al alcohol, etc (Doll y Peto, 1981). Es decir, si la persona fallece de cáncer, la probabilidad de que la causa del mismo sea a la exposición profesional a las radiaciones ionizantes es inferior o del mismo orden que las debidas a otros agentes relacionados con aspectos cotidianos de la vida.

EJEMPLO 2:

Una persona que haya recibido el vigente límite de dosis anual para el público (1 mSv) cada año de su vida (90 años) por el impacto de una instalación radiactiva o nuclear, habrá acumulado una dosis de $90 \times 1 = 90 \text{ mSv} = 0.09 \text{ Sv}$. Multiplicando este valor por el detrimento total para la población en general ($7.3 \times 10^{-2} = 0.073 \text{ Sv}^{-1}$) resulta un riesgo de $0.00657 = 0.66\%$. Esta es la probabilidad de que la muerte de la persona se deba a su exposición a las radiaciones ionizantes. En otras palabras, existe una probabilidad mayor del 99% de que la causa del deceso sea debida a otras causas.