



Tema 7: Dosimetría y Protección Radiológica

1. Introducción

La dosimetría es la rama de la ciencia que estudia la relación entre medidas cuantitativas de la radiación y sus efectos en un blanco o sistema (generalmente biológico, como un ser vivo o un ecosistema). La dosimetría es, por tanto, esencial para cuantificar la incidencia de los cambios biológicos en función de la cantidad de radiación recibida, así como para controlar la exposición a la radiación de seres vivos y sus efectos en el medio ambiente.

2. Unidades de la radiación

2.1. Necesidad de un sistema de unidades

Antes de empezar a estudiar los efectos de la radiación es necesario definir las unidades que usaremos para cuantificarlos. El término *efectos de la radiación* es extremadamente amplio, ya que depende mucho del material sobre el que incide la radiación, pero por razones comprensibles, desde el descubrimiento de la radiactividad existe un interés general en conocer el efecto de la radiación sobre un medio particular: el tejido biológico, o para ser más concretos: el efecto de la radiación sobre *nosotros*.

Tanto el tejido biológico como los efectos de la interacción de la radiación sobre él son muy complejos y constituyen un activo campo de investigación. Pero el tema va más allá de la complejidad técnica, ya que la preocupación social sobre su peligrosidad ha conducido a los cuerpos gubernamentales a promulgar leyes y regulaciones sobre este tema. El científico y, en general, cualquier persona en contacto frecuente con la radiación debe conocer dichos efectos y regulaciones legales al respecto. La falta de información y el sensacionalismo que rodea este tema (medios de comunicación, televisión, cine, etc) complican aún más las cosas y contribuyen muchas veces a crear un clima que no favorece a la objetividad.

Por estas razones, es fundamental abordar este tema de una forma objetiva y científica. Ciertamente uno de los primeros pasos a dar es la definición de un sistema de *unidades cuantitativas* con las que trabajar. Por razones históricas, en dosimetría existen principalmente dos sistemas de unidades:

Curie, Roentgen, Rad y rem: Constituyen el sistema convencional de unidades (CS).

La radiactividad es un fenómeno que el hombre conoce desde hace más de un siglo. En un principio los efectos de la radiación no se comprendían bien y, como consecuencia, surgió un sistema de unidades que no era del todo consistente, pero que se ha utilizado en la práctica hasta ahora. Estas unidades se usan, por ejemplo, en las regulaciones gubernamentales sobre radiación y en la calibración de muchos instrumentos de medida.

Becquerel, Gray y Sievert: En los últimos años la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación (ICRP) ha definido un sistema de unidades que es consistente con el sistema métrico decimal o SI. Estas unidades son de uso creciente, sobre todo en Europa.

Consideremos ahora los distintos fenómenos asociados con la radiación que tienen que ser cuantificados. Es necesario describir cuantitativamente lo que sucede desde que la radiación es emitida por una fuente hasta que produce su *efecto final*, lo que se puede dividir en cuatro etapas:

1. *Definición de intensidad de la fuente radiactiva (Curie, Becquerel)*. Son necesarias unidades que definan la tasa o razón a la que la radiación está siendo emitida y la cantidad total de radiación que puede eventualmente ser liberada por la fuente.
2. *Definición del campo de radiación alrededor de una fuente (Roentgen)*. La radiación se extiende alrededor de una fuente creando un campo. Se requieren unidades que especifiquen la intensidad de dicho campo en cada punto. Los campos de partículas cargadas (radiación α y β) se extienden a una distancia finita, mientras que el campo de partículas neutras (radiación γ , neutrones) disminuye progresivamente con la distancia.
3. *Interacción de la radiación con la materia (Rad, Gray)*. El campo de radiación interactúa con la materia. En este proceso se transfiere energía desde el campo de radiación a la materia. Son necesarias unidades que cuantifiquen la *concentración* de la energía depositada y la tasa o razón a la que se deposita.
4. *Consecuencias producidas por la energía depositada (rem, Sievert)*. Este es el paso final y más complicado. La razón está en que, especialmente en el caso del tejido biológico, el término *consecuencias* incluye una amplia variedad de mecanismos y efectos. Para ilustrar esto, consideremos dos tipos específicos de radiación:
 - a) Una fuente de ^{60}Co emite rayos γ en el rango de $\sim 1,25$ MeV. Supongamos que uno de los fotones penetra en la mano de un técnico que maneja la muestra y que a medida que se mueve a través del tejido y los huesos interactúa dos veces y se disipa. En cada interacción transfiere una parte de su energía a los electrones. Los electrones recorren sólo una corta distancia y transfieren su energía cinética al tejido a lo largo de dos cortas trayectorias aisladas.
 - b) El isótopo ^{222}Rn es un gas que emite partículas α . Si se inhala y se desintegra, la partícula α será emitida directamente en el tejido pulmonar. Las partículas α son pesadas y doblemente cargadas. Al frenarse dejan detrás una corta, pero densa estela de tejido ionizado.

No es necesario ser un Biólogo para apreciar que, incluso si la cantidad de energía depositada por estos dos eventos es idéntica, los respectivos efectos sobre el tejido biológico van a ser completamente diferentes. Este ejemplo ilustra las siguientes diferencias sobre las que queremos llamar la atención:

- Es necesario diferenciar entre campos de radiación *internos* y *externos*.
- Es necesario diferenciar si la energía se deposita de una forma *concentrada* o si se *distribuye* de forma disconexa
- Es necesario diferenciar en qué tipo de órgano se produce el depósito de energía.

Todos estos efectos deben ser tenidos en cuenta a la hora de evaluar el efecto de la radiación ionizante sobre el tejido biológico.

2.2. Unidades de intensidad de fuente. Actividad

La intensidad de fuente puede definirse en términos de *actividad*. Ya hemos definido la actividad al estudiar las leyes de la desintegración (capítulo 4).

$$A = \frac{\text{número de desintegraciones}}{\text{unidad de tiempo}} = \lambda N \quad (1)$$

donde N es el número de átomos de un isótopo radiactivo y λ es la constante de desintegración. La unidad de actividad en el sistema convencional (CS) de unidades se basa en la actividad de 1 g de Ra. Recordemos que la definición del curio es

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ desintegraciones/s} \quad (2)$$

Esta unidad de fuente resulta ser muy grande, sobre todo para las fuentes de radiación usadas en el laboratorio. Como consecuencia se utiliza toda una serie de unidades modificadas basadas en el curio. Esto incluye al ‘mili’, al ‘micro’ y al ‘pico’ curio, representando una fracción de 10^{-3} , 10^{-6} y 10^{-12} curios, respectivamente.

El comité ICRP introdujo el becquerel, que constituye la unidad de actividad en el SI de unidades:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/s.} \quad (3)$$

No obstante, el becquerel está en el extremo opuesto al curio y representa una unidad de actividad demasiado pequeña. Esto no sería un inconveniente siempre que estas unidades fueran utilizadas exclusivamente por la comunidad científica y tecnológica. Después de todo, puede adoptarse, y se adopta, la misma práctica que en el caso del curio, sólo que ahora los prefijos significan un cambio opuesto de magnitud usando los prefijos ‘kilo’ o ‘mega’ becquerel. No obstante, esta unidad presenta una pequeña complicación en el plano ‘social’. La siguiente tabla muestra las actividades de algunas sustancias comunes en becquerels

Tabla 1: Actividad de algunas sustancias.

1 litro de agua de grifo	$\simeq 10$ a 30 Bq
1 vaso de cerveza	$\simeq 40 \text{ Bq}$
1 vaso de leche	$\simeq 120 \text{ Bq}$
1 litro de una solución 1 molar de KCl	$\simeq 1200 \text{ Bq}$

Estas actividades son características de muestras estándar o ‘naturales’ de agua, cerveza, leche o cloruro potásico. El objetivo de las medidas de radiactividad es, a menudo, cuantificar los posibles aumentos de actividad por encima de su nivel normal, o radiación natural. No obstante, los niveles de actividad natural expresados en Bq pueden causar impresiones engañosas. Por ejemplo, si se anuncia que ha aumentado la actividad de la leche en un 5% sobre su valor normal, probablemente no mucha gente se interesará por ello. Sin embargo, si se hace público que la actividad de la leche ha aumentado a 126 Bq por vaso, la preocupación puede ser general.

2.3. Unidades del campo de radiación. Exposición

Una vez que ha sido establecida la intensidad de una fuente de radiación dada, cabe preguntarse cuál es la intensidad del campo de radiación creado en las cercanías de dicha fuente. Es muy importante poder responder cuantitativamente a esta pregunta. Después de todo, los procedimientos de protección contra la radiación dependen de las respuestas a preguntas como ¿cuánto puede uno acercarse a tal fuente? o ¿Cuánto tiempo puedo permanecer a tal distancia de una fuente?

Cuando la radiación pasa a través de la materia, produce ionización de los átomos y moléculas a su paso. Los iones producidos son químicamente activos y son los responsables de los cambios biológicos subsiguientes. Puesto que el daño producido por la radiación depende del número de iones producidos, es natural elegir la ionización como base de la medida.

2.3.1. Exposición (X).

Si una fuente radiactiva que emite rayos γ se coloca en aire, producirá ionización del aire que la rodea. Midiendo la cantidad de carga eléctrica producida en una masa de aire conocida, tendremos un método para medir la intensidad de la radiación o *dosis de exposición* . La definición formal de la exposición es la siguiente:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta M} \quad (4)$$

en donde ΔQ es la suma de todas las cargas eléctricas de los iones de un signo producidos en aire, cuando todos los electrones liberados por fotones en un elemento de volumen de aire, cuya masa es ΔM , son completamente detenidos en aire.

La unidad de exposición en el SI es el culombio por kilo-gramo (C/Kg), que no ha recibido ningún nombre especial.

En el sistema CS la unidad de exposición es el Roentgen (R) definido como

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg} \quad (5)$$

Originariamente el roentgen fue definido como “la cantidad de radiación gamma que produce 1 ue (unidad electrostática) de carga en un cm^3 de aire seco a presión y temperatura normales (PTN)”

Ejemplo. *Demostrar la equivalencia de las dos definiciones anteriores del Roentgen*

Recordemos que la unidad electrostática de carga se define como la carga que tienen dos partículas separadas 1 cm y que se ejercen una fuerza de 1 dina. Entonces

$$\begin{aligned} 1d &= K \frac{1(\text{ue})^2}{1\text{cm}^2} \Rightarrow \\ 1(\text{ue})^2 &= \frac{1d \cdot \text{cm}^2}{K} = \frac{10^{-5}\text{N} \times 10^{-4}\text{m}^2}{8,9875 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2} = \frac{10^{-9}}{8,9875 \times 10^9} \text{C}^2. \end{aligned}$$

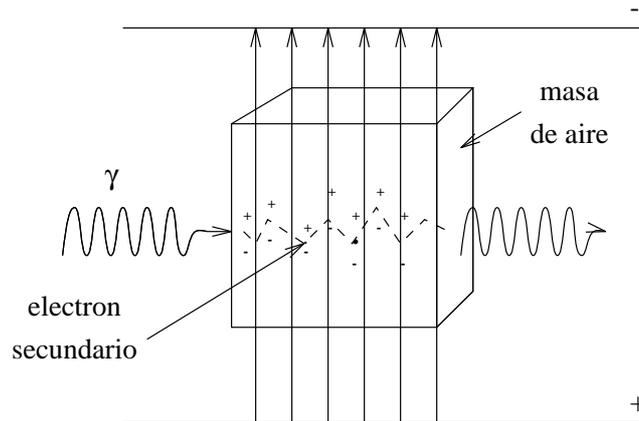


Figura 1: Medida de la exposición

Por lo tanto la unidad electrostática de carga vale

$$1\text{ue} = \frac{10^{-9}}{\sqrt{8,9875}}\text{C} = 3,33 \times 10^{-10}\text{C}. = \frac{10^{-9}}{3}\text{C}$$

Por otra parte, la densidad del aire a PTN es de $\rho = 1,293 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$. Por lo tanto, la masa de 1 cm^3 de aire es $\Delta m = 1,293 \times 10^{-3}\text{g}$. La dosis de exposición de un cm^3 de aire será de

$$X = \frac{3,33 \times 10^{-10}\text{C}}{1,293 \times 10^{-3}\text{g}} = 2,58 \times 10^{-7}\text{C/g} = 2,58 \times 10^{-4}\text{C/Kg} = 1\text{R}.$$

La definición de la dosis de exposición se ilustra en la figura 1. Un elemento de volumen de aire de masa ΔM está expuesto a una dosis de fotones (radiación X o γ). Cada fotón que interactúe con un átomo en dicho volumen producirá electrones secundarios que se propagan por el cubo produciendo pares iónicos adicionales. Si se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos colocados adecuadamente, los iones positivos serán recogidos en el cátodo y los iones negativos en el ánodo. La definición de exposición se refiere a la suma de las cargas de un signo concreto (cualquiera de los dos) y no a ambos.

Conviene subrayar lo siguiente:

- El roentgen se aplica como unidad de dosis solamente a radiación X o γ .
- La definición del roentgen incorpora las propiedades del medio en que tiene lugar la ionización (en este caso el aire).

Finalmente, en ocasiones es preferible medir la razón o tasa de exposición dX/dt (exposición por unidad de tiempo) que se mide en Roentgen por unidad de tiempo, como se muestra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo. Una cámara de ionización posee un volumen activo de 2.5 cm^3 . En cierto campo de rayos gamma se colecta una carga de $1,2 \times 10^{-9} \text{ culombios}$ en 10 minutos. Calcular la dosis de exposición y la razón de exposición.

Dosis de exposición:

$$X = \frac{1,2 \times 10^{-9} \text{C}}{3,33 \times 10^{-10} \text{ C/ue} \times 2,5 \text{ cm}^3} = 1,44 \text{ R}$$

Suponiendo que el campo de radiación es constante, la razón de exposición será:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{1,44 \text{ R}}{10 \times 60 \text{ s}} = 2,4 \text{ mR/s.}$$

2.4. Unidades de la deposición de energía. Dosis de absorción

Una de las dificultades al definir unidades de radiación es que tiene que ser aplicable a distintos tipos de radiación (α , β , γ , neutrones, ...). Existe un denominador común para todos los tipos de interacción de la radiación con la materia: en todos los casos se transfiere energía a la materia. La cantidad total de energía transferida, así como la razón de transferencia puede servir como una medida cuantitativa de la interacción de la radiación con la materia (quede claro que no estamos hablando del efecto *final* de la radiación; ese es un paso posterior).

2.4.1. Dosis absorbida (D).

La magnitud que está basada en la transferencia de energía se denomina *dosis absorbida* o, a menudo, simplemente *dosis*, y está definida mediante:

$$D = \frac{\text{energía depositada}}{\text{unidad de masa}} = \frac{\Delta E}{\Delta M}, \quad (6)$$

donde ΔE es la energía depositada por la radiación en una porción de material de masa ΔM . Esta definición puede idealizarse especificando que la transferencia de energía ocurre en un punto x , en el límite en que $\Delta M \rightarrow 0$. Esta no es una cuestión trivial, puesto que no toda la energía transferida a la materia en el punto x *permanecerá* en dicho punto, lo cual forma parte del último paso.

La unidad de dosis en el SI es el Gray (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg} \quad (7)$$

La unidad de dosis en el sistema CS es el rad (Radiation Absorbed Dose)

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 0,01 \text{ J/Kg} = 0,01 \text{ Gy} \quad (8)$$

Ambas unidades, Gray y rad corresponden a dosis muy elevadas, por lo que en la práctica se usan frecuentemente dosis fraccionales como el milirad (mrad) o el miligray (mGy).

Si se conoce la energía media de ionización es posible relacionar la dosis de exposición con la dosis absorbida. En el caso del aire, la energía media necesaria para producir un ion es de ~ 34 eV. Por lo tanto el cálculo de la dosis absorbida en aire es directo, como muestra el siguiente ejemplo.

Ejemplo. Calcular la dosis absorbida en aire cuando la exposición es 1 R.

Energía para producir un ion en aire: $E = 34$ eV/ion

Carga separada por cada ion: $q = e = 1,6 \times 10^{-19}$ C

Energía que produce un culombio de carga en aire:

$$E = \frac{34 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 34 \text{ J/C.}$$

Por lo tanto, la dosis absorbida en aire expuesto a 1 R es

$$D = 2,58 \times 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{Kg}} \times 34 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 8,8 \times 10^{-3} \text{ J/Kg} = 8,8 \times 10^{-3} \text{ Gy} = 0,88 \text{ rad}$$

Si la misma cantidad de radiación de 1 R incide sobre tejido biológico blando, en lugar de aire, la dosis absorbida es de

$$D = 9,5 \times 10^{-3} \text{ Gy} = 0,95 \text{ rad} \quad (\text{en tejido})$$

Esta unidad se denomina rep (Roentgen-Equivalent-Physical), pero hoy en día está obsoleta. Puede suponerse que, para tejido blando, la exposición a un roentgen de rayos γ es aproximadamente igual a una dosis absorbida de $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$.

La *razón o tasa de dosis absorbida* es la velocidad a que se absorbe la energía por unidad de masa y se expresa en las unidades rad/tiempo o Gy/tiempo, como en el siguiente ejemplo.

Ejemplo. El flujo de fotones a 20 cm de una fuente de rayos γ de 1 MeV es de $j = 4 \times 10^8$ fotones/cm²s. El coeficiente de absorción másico del tejido para fotones de esta energía es de $\mu_a/\rho = 0,03$ cm²/g. ¿Cuál es la razón de dosis de absorción por minuto en dicha localización? Calcular la dosis absorbida tras una hora de exposición.

El coeficiente de absorción másico representa la fracción de energía absorbida por unidad de tiempo y por unidad de flujo de fotones. Por lo tanto, la razón de dosis viene dada por

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= E j \mu_a / \rho = 1 \text{ MeV} \times 4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 0,03 \text{ cm}^2 / \text{g} \\ &= 0,12 \times 10^8 \text{ MeV/g} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

Puesto que $1 \text{ J} = 6,242 \times 10^{12} \text{ MeV}$, se tiene

$$\begin{aligned}\frac{dD}{dt} &= 0,12 \times 10^8 \times \frac{1 \text{ J}}{6,242 \times 10^{12} \text{ MeV}} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \times \frac{1000 \text{ g}}{\text{Kg}} \times \frac{\text{MeV}}{\text{g} \cdot \text{s}} \\ &= 0,115 \text{ Gy/min} = 11,5 \text{ rad/min}\end{aligned}$$

La dosis absorbida en una hora es $D = 0,115 * 60 \text{ Gy} = 6,9 \text{ Gy}$.

El paso final en este tipo de cálculos es la evaluación del *efecto biológico* que tienen las *dosis* de radiación depositadas. El resultado obtenido se llama entonces *dosis equivalente*, o simplemente *dosis*. Por lo tanto, el término *dosis* puede usarse en dos contextos. Se distinguen entre ellos por el nombre de las unidades. Las unidades para la *dosis equivalente* son el *rem* en el sistema CS y el *Sievert* en el SI. Las consideraremos en más detalle en la sección 3.

3. Fuentes de radiación

3.1. Fuentes de radiación naturales

Antes de proceder con la evaluación de los efectos biológicos de la radiación, es conveniente familiarizarse con el tipo de fuentes radiactivas que podemos encontrar, así como con su orden de magnitud. Comenzamos por las fuentes de radiación conocidas por el nombre genérico de *naturales*.

Los términos *natural* y *radiación* han adquirido en el uso popular significados y connotaciones casi opuestas. Desde este punto de vista, *natural* representa algo bueno y saludable, mientras que *radiación* es algo maligno y dañino. En nuestro caso, debemos tratar con estos términos de una manera objetiva y cuantificable. A este nivel, los dos tipos de radiación *natural* y *hecha por el hombre* son idénticos.

Si procedemos a cuantificar las fuentes de radiación naturales existentes, el hecho es que *la mayor parte de la radiación a que está expuesto el hombre es natural*.

De hecho, si descontamos la exposición a los rayos X en medicina, entonces más del 99 % de la radiación que afecta al hombre es *natural*. Incluso los rayos X médicos constituyen menos de 1/3 del fondo de radiación estándar. El hombre lleva expuesto a estos niveles de radiación desde sus orígenes, cuando los niveles de radiación eran más altos.

Los niveles de radiación a que estamos expuestos cotidianamente poseen las siguientes características:

- Los niveles de radiación naturales son de una magnitud considerable.
- Esto es, son considerables comparados con nuestra habilidad para *medir* la radiación y también comparados con los *límites de radiación* impuestos por las regulaciones sobre protección.

La tabla 2 resume las fuentes de radiación naturales más importantes a las que está expuesto el ciudadano medio. Están divididas en dos categorías: fuentes externas e internas.

Tabla 2: Fuentes de radiación naturales
(dosis anuales medias)

Fuentes externas	
Rayos cósmicos	~ 40 mrem
Radiación terrestre	~ 30 a 70 mrem
Fuentes internas	
^{40}K	~ 20 mrem
Elementos pesados	~ 8 mrem
^{12}C	~ 1 mrem

Los rayos cósmicos. Consideremos en primer lugar las fuentes externas. La radiación cósmica es un nombre genérico que agrupa un amplio rango de partículas que provienen del espacio exterior e inciden sobre la alta atmósfera de nuestro planeta. Algunas de ellas son partículas cargadas (principalmente protones y α s) con energías usualmente en el intervalo de 100 a $100\,000$ MeV, aunque han llegado a observarse energías de hasta 10^{14} MeV. Tales energías son enormes comparadas con las energías típicas de las desintegraciones nucleares (~ 10 MeV).

Cuando estas partículas golpean los niveles superiores de la atmósfera es virtualmente posible cualquier reacción que no viole los principios de conservación básicos. En su interacción, estas partículas producen cascadas de partículas cargadas y neutras.

Dada la elevada energía de los rayos cósmicos, algunas de las partículas secundarias logra atravesar la atmósfera, produciendo un fondo de radiación a nivel del mar, suficiente para exponernos a una dosis de ~ 30 mrem/año. Esta dosis aumenta con la altitud. Por ejemplo, en Denver la dosis alcanza los ~ 60 mrem/año, mientras que en Lima es de ~ 100 mrem/año. Por la misma razón los pilotos, azafatas y usuarios frecuentes de viajes aéreos están expuestos niveles de radiación más elevados.

Radiación terrestre. La segunda fuente de radiación universalmente distribuida e inevitable la constituyen los isótopos radiactivos del *interior de la corteza terrestre*. Existen alrededor de 70 isótopos radiactivos naturales, que pueden dividirse en dos categorías:

- *Los núcleos primordiales*, que existen desde los orígenes de la tierra. Se estima (parcialmente en base a la evidencia que proporcionan estos isótopos) que la tierra se formó hace $\sim 4,9 \times 10^9$ años. Los isótopos radiactivos capaces de sobrevivir tal cantidad de tiempo, deben tener una vida media particularmente grande. Los más comunes son:

$$^{238}\text{U} \quad (T_{1/2} = 4,5 \times 10^9 \text{ años})$$

$$^{235}\text{U} \quad (T_{1/2} = 7,5 \times 10^8 \text{ años})$$

$$^{232}\text{Th} \quad (T_{1/2} = 1,4 \times 10^{10} \text{ años})$$

$$^{40}\text{K} \quad (T_{1/2} = 1,3 \times 10^9 \text{ años})$$

La mayoría de los isótopos primordiales pertenecen al grupo de los metales pesados. Esto explica por qué los suelos rocosos, ricos en metales pesados, poseen un fondo de radiactividad más alto. La excepción es el ^{40}K . El potasio es un elemento muy común que es un componente esencial del tejido orgánico. Es, por lo tanto, un hecho, que *nosotros* somos radiactivos y podemos ser considerados como *fuentes radiactivas*. Esto pone de manifiesto la necesidad de cuantificar los fenómenos asociados a la radiactividad. (En caso contrario se llegarían a plantear situaciones absurdas. Por ejemplo, en cierto estado de USA se presentó un proyecto de ley que prohibía que *ningún* material radiactivo cruzara la frontera del estado. Afortunadamente se le hizo notar al comité correspondiente que, en caso de que dicha ley se aprobara, ninguna persona podría salir ni entrar del estado.)

- La otra categoría de isótopos radiactivos terrestres está asociada a la *acción de los rayos cósmicos*. Estas partículas generan del orden de 25 especies de núcleos radiactivos que eventualmente se depositan en la superficie terrestre. Uno de los más interesantes es el ^{14}C , que se produce por la interacción del nitrógeno atmosférico con los neutrones cósmicos. El ^{14}C tiene una vida relativamente corta, de 5730 años. Químicamente es indistinguible de los átomos de carbón normales y es, por tanto, incorporado por los organismos biológicos, especialmente las plantas, formando parte de sus tejidos. Posteriormente, tras la muerte de la planta, ésta deja de absorber C de la atmósfera y el número de núcleos de ^{14}C que contiene va disminuyendo por desintegración. La concentración de este isótopo sirve como indicación de la fecha en que se detuvo el proceso de absorción de C. Esta es la base del método de datación del ^{14}C .

La radiación terrestre es menos uniforme que la radiación cósmica. Allá donde la corteza del manto terrestre está al descubierto, generalmente el fondo de radiación terrestre es mayor. La dosis media puede variar entre ~ 15 a ~ 200 rem, dependiendo del lugar. Existen localizaciones específicas, por ejemplo en ciertos puntos de Brasil y La India, donde existen vetas de torio próximas a la superficie, donde el fondo de radiación terrestre puede alcanzar los 20 000 mrem por año.

3.2. Fuentes de radiación artificiales

Las fuentes de radiación hechas por el hombre constituyen una pequeña fracción de la cantidad total de radiación a que estamos expuestos. La mayor contribución proviene de los rayos X médicos. En la tabla 3 podemos ver la dosis media de las más comunes fuentes de radiación artificiales. No se incluyen en la tabla las dosis debidas a tratamientos médicos con radiación ni al radon (discutido más abajo). Otra fuente de radiación es el tabaco, del que se habla más abajo.

Tabla 3: Fuentes de radiación artificiales
(dosis anuales medias, mrem)

Rayos X médicos	Pacientes	100
	Personal médico	300-500
Rayos X dentales	Pacientes	3
	Personal dental	50-120
Viajes aéreos	Pasajeros	3
	Tripulación	160
Vivienda	Piedra	50
	Ladrillo, hormigón	35
Centrales nucleares		2-10

Como se muestra en la tabla 3, la primera fuente de radiación artificial la constituyen los rayos X médicos. Nótese que los números de la tabla son valores medios y que en casos específicos las dosis podrían ser apreciablemente mayores.

La segunda fuente de radiación en orden de importancia la constituyen las edificaciones, ya que los materiales de construcción, especialmente piedra, ladrillo y hormigón, contienen elementos pesados, incluyendo algunos que son radiactivos (de forma natural). En efecto, algunos de los más famosos edificios y monumentos construidos en granito y mármol, presentan también los mayores niveles de radiación. La radiación puede alcanzar niveles de 100 mrem/año en espacio rodeados por muros masivos de granito y mármol. Los edificios más convencionales de ladrillo y hormigón pueden comunicar una dosis de ~ 50 mrem/año a sus habitantes.

Aparte de estas dos categorías, los niveles de radiación de otras fuentes artificiales son considerablemente menores. Por ejemplo, los viajes aéreos contribuyen con unos 3 mrem por año en promedio. Naturalmente, esta cifra depende de las veces que tomemos un avión cada año. No obstante, los valores mostrados son lo suficientemente bajos como para que no haya necesidad de preocuparse por ellos a la hora de viajar.

Cabe mencionar aquí la *televisión*, no porque sea una fuente significativa de radiación, sino por todo lo contrario, puesto que ésta es una fuente de radiación despreciable. Por mucho que veamos la televisión no recibiremos más de ~ 2 a 5 mrem por año. La forma en que las imágenes se forman en la pantalla de TV es una prueba directa de que la radiación es un fenómeno que puede controlarse de forma muy precisa. En efecto, un tubo de TV es un acelerador que emite electrones directamente en dirección al televidente. Estos electrones transfieren su energía al material fosforescente depositado en la pantalla y al mismo cristal de la pantalla. Parte de la radiación secundaria emitida debido a la interacción de estos electrones está en el espectro de luz visible y puede percibirse por el ojo humano. Esta es la imagen que podemos ver. Otra parte es emitida como rayos X muy blandos, que pueden producir un campo de radiación medible. Pero, como hemos comentado, el efecto acumulado de este campo es bastante pequeño.

El hecho de *fumar* puede producir un efecto relativamente grande debido a la radiación (grande en comparación con pequeñas dosis). Junto con los alquitranes y otros productos cancerígenos, se depositan en los pulmones ciertas cantidades de isótopos radiactivos. Particularmente dañino es el ^{210}Pb y su hijo el ^{210}Po , que son producidos en la cadena de desintegración del ^{222}Rn . Un fumador puede exponer sus pulmones a dosis locales muy grandes debido a estos isótopos (nótese que en este caso la fuente es natural, aunque colo-

camos este punto en la categoría de “fuentes hechas por el hombre”, porque el fumar no lo es). Se ha estimado que quien fuma un paquete y medio al día puede estar exponiendo su tejido pulmonar a dosis de hasta 8000 mrem/año. La razón de que este número sea tan alto es porque esta dosis se deposita en un volumen pequeño de tejido. Si la dosis se calculara en base al cuerpo completo, caería dentro de unos pocos mrem por año.

Finalmente llegamos a las *centrales nucleares*. La cantidad de material radiactivo emitido por las centrales nucleares se controla muy estrechamente y, por tanto, se conoce muy bien el campo de radiación alrededor de una central nuclear. Las dosis de radiación generadas por esta fuente son las siguientes:

- Para la población en general: 1 mrem/año.
- Para personas viviendo cerca de una central nuclear: ~ 10 mrem/año.

La magnitud de estos valores puede compararse con los del fondo de radiación natural. La dosis comunicada por las centrales nucleares es en general menor del 1% de la total recibida al año por otras fuentes naturales y cae, por tanto, dentro de la categoría llamada *ruído de fondo*. Incluso es muy posible que personas que vivían cerca de una central nuclear y cambien su residencia incrementen ligeramente su dosis al pasar a vivir de una casa de madera a otra de ladrillo.

3.3. Efectos del radon

Consideramos el radon separadamente por dos razones: puede producir dosis con grandes variaciones en localizaciones concretas y además no es evidente si esta fuente pertenece a la categoría de *natural* o *artificial*. El origen del radon es, por supuesto, natural, puesto que es producido por los isótopos primigenios en la corteza terrestre. No obstante, la severidad del *problema del radon* depende en gran medida de la naturaleza y localización del edificio en donde se esté habitualmente. La magnitud del problema del radon se ha incrementado desde la aparición de edificaciones muy eficientes en materia de aislamiento. Tales edificios conservan muy bien el calor, pero también otros materiales que se liberan en su interior. Esto incluye al gas radiactivo radon y a los productos de su desintegración.

El radon es uno de los productos de la desintegración del ^{238}U , como se ve en la figura 2. El radon es un emisor α y γ con semivida relativamente corta (3.8 d) y la característica que lo hace un miembro remarcable de la cadena es que es un *gas noble*. Esto significa que no reacciona químicamente y, por tanto, permanece en la atmósfera una vez liberado. Hace mucho tiempo que este gas es tristemente conocido por alcanzar peligrosas concentraciones en las minas de uranio. La solución a la excesiva concentración de radon también se conoce desde hace tiempo: la ventilación es la única forma de eliminarlo.

Puesto que es un gas que está entrelazado en una cadena secuencial de materiales sólidos no volátiles, el radon puede dar movilidad a los isótopos en el segmento de la cadena que le sigue. Y aquí es donde reside el mayor problema. Un esquema simplificado de este proceso se muestra en la figura 3.

La secuencia inicial de desintegración en la cadena está compuesta únicamente por elementos sólidos, hasta el radio-226. Son metales pesados y se encuentran generalmente en

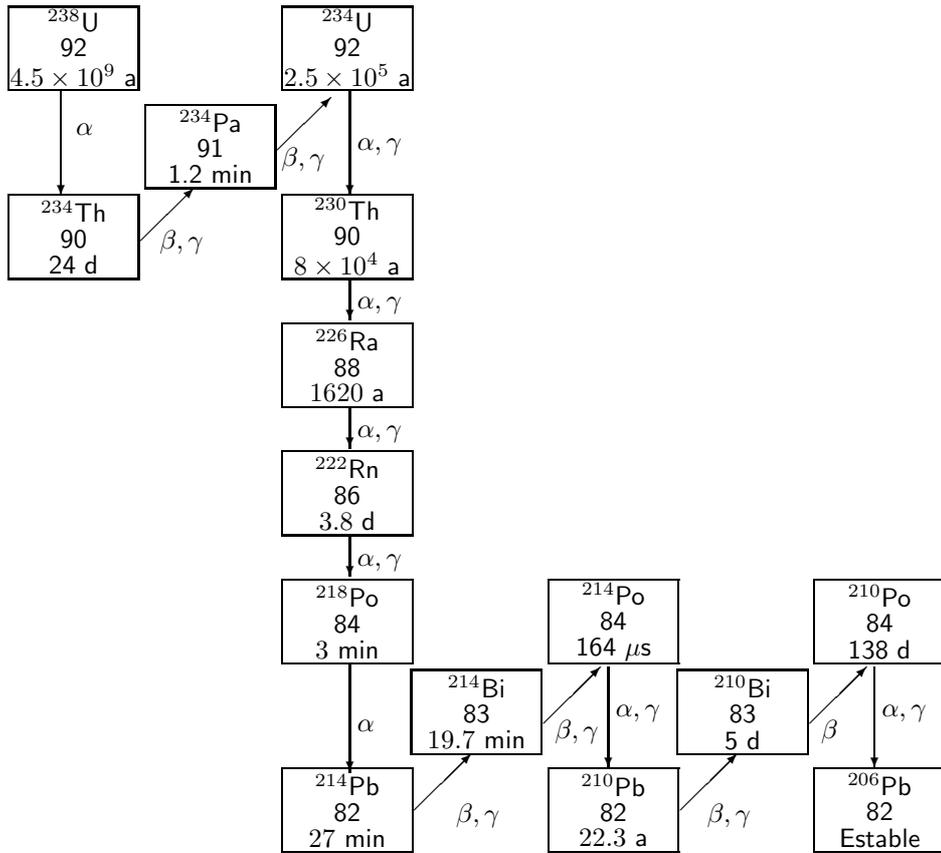


Figura 2: Cadena de desintegración del ^{238}U .

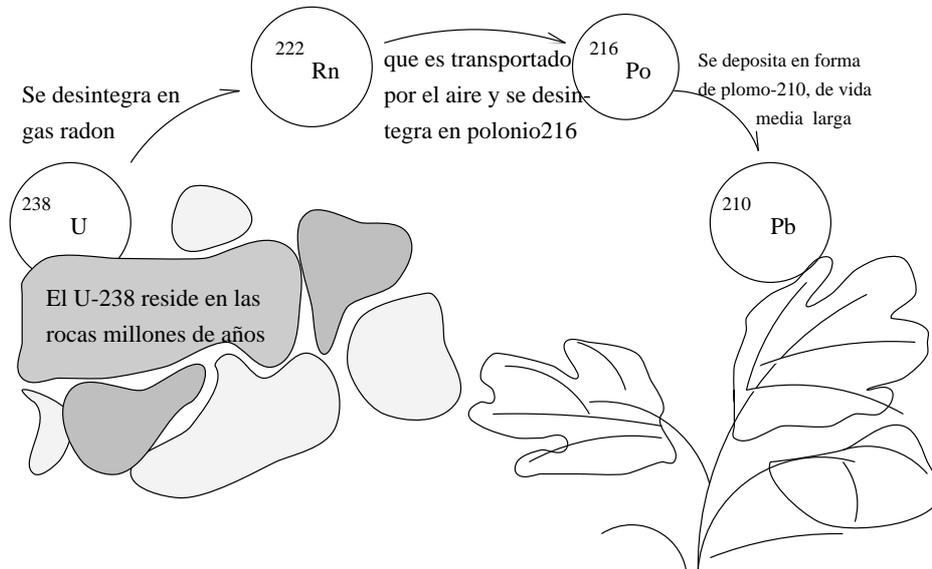


Figura 3: Propagación del radón

formaciones de rocas, donde permanecen durante años hasta que el ^{226}Ra (radio-226) se desintegra en ^{222}Rn (radon-222). Desde este momento el material es volátil y puede difundirse en la atmósfera por cualquier fisura en la roca.

Por sí sólo, el Rn no crearía un gran problema, ya que es un gas noble y no se deposita en los tejidos. Puesto que está presente en la atmósfera, puede ser inhalado, pero como no reacciona químicamente, la mayor parte será exhalada de nuevo en cuestión de segundos o minutos. La probabilidad de que se desintegre en este intervalo de tiempo es pequeña. No obstante, el siguiente miembro de la cadena, el Polonio-218, es sólido de nuevo. Por lo tanto, puede depositarse, reaccionar químicamente y permanecer localizado. Más aún, el ^{218}Po es sólo el primer miembro de una secuencia de desintegración muy rápida (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb) que emitirá numerosas partículas cargadas muy peligrosas. Con el ^{210}Pb , con semivida de 22.3 años, hay una *pausa* relativa en la cadena, por lo que la concentración de ^{210}Pb se incrementa paulatinamente. Esto explica la importancia de este isótopo, que ya apuntamos, por ejemplo, cuando discutimos los efectos de la radiación en los fumadores. Ahora no es difícil entender cómo llega el plomo a formar parte del tabaco: el Rn de la atmósfera se desintegra produciendo el ^{210}Pb , que se deposita en las hojas de la planta del tabaco cuando está creciendo. Puesto que este isótopo tiene una semivida de 22.3 años, existe una probabilidad alta de que se deposite en los pulmones de un fumador.

Ya podemos explicar también en qué consiste el *problema del radon* en las viviendas y por qué esta fuente de radiación puede ser tan variable. La fuente última de Rn es el subsuelo. No obstante, las condiciones del suelo, especialmente la permeabilidad, pueden variar considerablemente. Los edificios construidos sobre terrenos permeables o formaciones rocosas con fisuras pueden servir como *carpas* para el radon que se difunde hacia arriba. Por tanto, el radon que, en condiciones normales, se difundiría en la atmósfera, queda enclaustrado en el interior de los edificios.

Ejemplo *El sótano de una casa tiene un volumen de 160 m^3 . A través del suelo se filtra radon a razón de 40 pCi de ^{222}Rn por hora. Calcular la concentración y actividad asintótica por unidad de volumen del radon ($t \rightarrow \infty$) en este sótano, suponiendo que no hay ventilación.*

Sea $N(t)$ el número de átomos de Rn y R el número de átomos de radon que se filtran en el sótano por unidad de tiempo. Se tiene

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N$$

de donde,

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N = R$$

Multiplicando por $e^{\lambda t}$,

$$\frac{dN}{dt} e^{\lambda t} + \lambda N e^{\lambda t} = R e^{\lambda t},$$

obtenemos en el primer miembro una derivada exacta:

$$\frac{d}{dt} (N e^{\lambda t}) = R e^{\lambda t}.$$

Integrando los dos miembros entre 0 y t :

$$(N(t)e^{\lambda t} - N(0)) = \frac{R}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1)$$

Despejando $N(t)$ y suponiendo que inicialmente $N(0) = 0$,

$$N(t) = \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}).$$

El número asintótico de átomos se obtiene tomando el límite $t \rightarrow \infty$

$$N(\infty) = \frac{R}{\lambda}$$

Por tanto, basta que calculemos λ y R . A partir de la semivida $t_{1/2} = 3,8$ d, obtenemos la constante de desintegración

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{3,8 \times 24 \times 3600\text{s}} = 2,1 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}.$$

Por otra parte, sabemos que el Rn se filtra a razón de

$$40 \text{ pCi/h} = \frac{40 \times 10^{-12} \times 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}}{3600 \text{ s}} = 4,1 \times 10^{-4} \text{ Bq/s}$$

Ahora bien, dado que la actividad es $A = \lambda n$, el número de átomos de Rn con una actividad de $4,1 \times 10^{-4}$ Bq es

$$n = \frac{4,1 \times 10^{-4} \text{ Bq}}{\lambda} = \frac{4,1 \times 10^{-4} \text{ Bq}}{2,1 \times 10^{-6} \text{ s}} = 195 \text{ átomos}$$

Por lo tanto, $R = 195$ átomos/s y el número asintótico de átomos será

$$N(\infty) = \frac{R}{\lambda} = \frac{195}{2,1 \times 10^{-6}} \text{ átomos} = 92,9 \times 10^6 \text{ átomos}$$

La concentración asintótica será de

$$\rho(\infty) = \frac{N(\infty)}{V} = \frac{92,9 \times 10^6 \text{ átomos}}{160 \text{ m}^3} = 0,58 \times 10^6 \text{ átomos/m}^3$$

La actividad asintótica por unidad de volumen será entonces

$$\frac{A(\infty)}{V} = \lambda \rho(\infty) = 2,1 \times 10^{-6} \times 0,58 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3 = 1,22 \text{ Bq/m}^3 = 33 \text{ pCi/m}^3$$

La concentración normal de ^{222}Rn en la atmósfera es de ~ 3 a 4 pCi/m³ y, por lo tanto, la concentración en el sótano es apreciablemente alta. Supongamos ahora que hay ventilación que cambia el aire una vez al día.

Ejemplo Repetir los cálculos del problema anterior, suponiendo que hay un sistema de ventilación que cambia el aire del sótano una vez al día.

Suponemos que el sistema de ventilación funciona continuamente. Si inicialmente hay N_0 átomos que al cabo de un día son completamente eliminados, en un intervalo de tiempo dt el número de átomos eliminados será

$$dN_0 = N_0 \frac{dt}{1d} \Rightarrow \frac{dN_0}{dt} = \frac{N_0}{1d} \equiv \lambda_v N_0.$$

Esto quiere decir que La tasa de disminución de Rn debido a la ventilación está dada por $\lambda_v N$ y, por tanto, el efecto de la ventilación puede tenerse en cuenta sumando a su constante de desintegración la asociada a la ventilación:

$$\lambda_v = \frac{1}{1 \text{ día}} = \frac{1}{24 \cdot 3600 \text{ s}} = 1,157 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

El número asintótico de átomos será

$$N(\infty) = \frac{R}{\lambda + \lambda_v} = \frac{195}{2,1 \times 10^{-6} + 1,157 \times 10^{-5}} \text{ átomos},$$

es decir,

$$N(\infty) = 14,3 \times 10^6 \text{ átomos}$$

La concentración asintótica será de

$$\rho(\infty) = \frac{N(\infty)}{V} = \frac{14,3 \times 10^6 \text{ átomos}}{160 \text{ m}^3} = 0,89 \times 10^5 \text{ átomos/m}^3$$

La actividad asintótica por unidad de volumen será entonces

$$\frac{A(\infty)}{V} = \lambda \rho(\infty) = 2,1 \times 10^{-6} \times 0,89 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3 = 0,19 \text{ Bq/m}^3 = 5,1 \text{ pCi/m}^3.$$

4. Efectos biológicos de la radiación

4.1. Mecanismos de interacción de la radiación con el tejido vivo

Hasta ahora hemos estudiado los conceptos y unidades asociados a intensidad de fuente de radiación, exposición y dosis depositada. En esta sección nos preocuparemos por el *efecto final* de la radiación (en el sentido biológico). Esto no es fácil de cuantificar. Puede ser útil recordar primero la gran diferencia existente entre el mundo del núcleo (y las radiaciones que emite) y el mundo de las capas externas de electrones.

La biología se basa en la química, y el mundo químico es el mundo de las capas externas de electrones. Todas las moléculas, incluyendo las que toman parte en los procesos biológicos, deben sus características a las interacciones que ocurren entre los electrones externos de sus átomos. Los enlaces establecidos por estas interacciones tienen energías de ligadura de varios

eV, hasta, como mucho, ~ 10 eV. En la escala de energías que caracteriza las interacciones nucleares, tales energías parecen completamente despreciables (recuérdese que el nucleón está ligado al núcleo en promedio por una energía de ~ 7 MeV).

Tal comparación muestra que muchas veces “pequeño” no significa “despreciable”. Después de todo son los enlaces químicos los que configuran nuestro mundo. En este nuestro entorno, el rango de energía de 1 a 10 eV puede muy bien considerarse “normal”, mientras que las partículas de muy alta energía que penetran en este mundo “normal” desde el núcleo son las excepciones.

Cuando una partícula α de alta energía, un núcleo de retroceso, o incluso un electrón dispersado por un rayo γ atraviesan la materia, que está tejida por las ligaduras de los electrones externos, es como si una bala de cañón atravesara una telaraña. Si la partícula está cargada, su campo eléctrico rompe las ligaduras electrónicas y deja a su paso una traza de iones y electrones. Después de que la partícula haya pasado, la mayor parte de estos iones se recombinan. No obstante esta recombinación es parcialmente aleatoria y no hay garantía de que se formen las ligaduras originales. La densidad de las ligaduras perturbadas depende de la carga y la velocidad de la partícula incidente. Por ejemplo, la probabilidad de que se rompa un enlace se incrementa si la fuerza perturbadora actúa durante mucho tiempo. Por lo tanto, mientras más pesada, y por tanto, más lenta, sea la partícula cargada (como las partículas α y los núcleos de retroceso), más densa será la traza de enlaces rotos a su paso (más que, por ejemplo, un haz de electrones).

En cambio, las partículas sin carga no dejan ninguna traza hasta el momento en que interactúan (probabilísticamente). En este punto generarán una partícula cargada (usualmente un electrón en el caso de rayos γ), y dicha partícula cargada se disipará posteriormente produciendo una traza de iones. Por lo tanto, la traza de un rayo γ es una sucesión de cortas trazas (generadas por electrones) separadas por distancias relativamente grandes.

Por lo tanto, debe quedar claro a estas alturas que la cantidad de “daño” producido por la radiación sobre el tejido biológico depende, no sólo de la cantidad total de energía depositada, sino también de la naturaleza de las trazas de iones que dejan las partículas a su paso. En efecto, las trazas consistentes en una densa concentración de iones son las más peligrosas. Por lo tanto es útil clasificar las radiaciones ionizantes en base a una razón de deposición de energía denominada *transferencia lineal de energía* o LET. La LET se define como la energía depositada por unidad de longitud de recorrido de la radiación, es decir:

$$LET = \frac{dE}{dx}.$$

Este parámetro puede variar sustancialmente para diferentes tipos de radiación. Por ejemplo, la LET para una partícula α de 1 MeV es ~ 70 keV/ μ m, mientras que es sólo de ~ 0.2 keV/ μ m para un electrón con la misma energía. Las α y otras partículas pesadas son radiación de alta LET, mientras que los electrones son radiación de baja LET.

4.2. Efectividad biológica relativa

Las medidas de la dosis absorbida en términos de ‘rads’ o ‘grays’ son un adecuado punto de partida para determinar los daños de la radiación, pero, como organismos biológicos, no

Tabla 4: Factor de calidad en función del LET

LET (keV/ μm)	Q
3.5 o inferior	1
7	2
23	5
53	10
175 o superior	20

estamos interesados tanto en la energía total depositada, como en el efecto que esta energía produce en las células vivas. Para cuantificar este efecto, necesitamos un parámetro que relacione la dosis con las consecuencias biológicas producidas.

4.2.1. Factor RBE.

El factor de *efectividad biológica relativa* o factor RBE sirve para este propósito. Es un parámetro determinado empíricamente mediante la siguiente secuencia de experimentos:

- Un tejido o un órgano es irradiado con una radiación estándar cuyo RBE es igual a 1 por definición, consistente en rayos X de 200 keV.
- El experimento se repite depositando la misma dosis (la misma energía) usando otra fuente de radiación i .

El factor RBE se define entonces como

$$\text{RBE} = \frac{\text{Impacto biológico de la radiación } i}{\text{Impacto biológico del rayo X de 200 keV}} \quad (9)$$

La determinación del factor RBE es, en principio directa, pero está supeditada a la gran variabilidad de respuesta de los distintos tipos de tejido. Por lo tanto, para aplicar el factor RBE debemos conocer, no sólo el tipo de radiación sino también el tipo de tejido irradiado. Tal información no está siempre disponible. Se conoce bajo condiciones clínicas y se usa sobre todo en radiobiología. En el campo de protección de la radiación el tipo de tejido que está siendo irradiado no se especifica fácilmente. Por tanto es necesario una cantidad que pueda ser aplicada para todos los tipos de tejido.

4.2.2. Factor de calidad (Q).

El Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP) ha definido el *factor de calidad*, denotado por el símbolo Q . Este parámetro es una aproximación a los factores RBE. Está tabulado en función del LET de la radiación (tabla 4).

Los valores de Q también se pueden encontrar tabulados para distintos tipos genéricos de radiación (tabla 5). En las tablas vemos que los valores de Q más altos se asignan a las partículas cargadas (α y β) o a las que pueden producir partículas cargadas masivas (por ejemplo los neutrones energéticos, que pueden chocar contra un núcleo y producir un ión cargado de retroceso).

Tabla 5: Factor de calidad para distintos tipos de radiación

Tipo de radiación	Q
Rayos X y γ	1
rayos β , $E > 0,03$ MeV	2
rayos β , $E < 0,03$ MeV	1.7
Rayos α naturales	10
Núcleos pesados de retroceso	20
Neutrones:	
Térmicos hasta 1 keV	2
10 keV	2.5
100 keV	7.5
500 keV	11
1 MeV	11
2.5 MeV	9
5 MeV	8
7 MeV	7
10 MeV	6.5
14 MeV	7.5
20 MeV	8
Energía no especificada	10

Al evaluar la efectividad biológica de la radiación nos encontramos con incertidumbres a la hora de asignar los valores numéricos. De ahí que los valores de Q se redondeen a, como mucho, dos decimales, puesto que no es posible una cuantificación más precisa.

4.2.3. Dosis equivalente (H).

Los factores de calidad son importantes porque se usan para definir una *dosis equivalente* biológica. Ésta representa una *dosis* que es proporcional al *efecto* biológico de la energía absorbida de la radiación. Para algunos tipos de radiación, como neutrones o partículas cargadas, esta dosis será considerablemente mayor que la *dosis absorbida*. La definición de la *dosis equivalente* (H) es la siguiente:

$$H = DQ, \quad (10)$$

donde D es la dosis equivalente y Q el factor de calidad.

En las unidades convencionales (D expresado en rad) la dosis equivalente se expresa en “rem” (Roentgen-Equivalent-Man). Esta unidad, o más frecuentemente el mili-rem (mrem), es todavía ampliamente utilizada, sobre todo en USA.

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \cdot Q \quad (11)$$

En el SI (D en Grays) la unidad de dosis equivalente es el *sievert* (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot Q \quad (12)$$

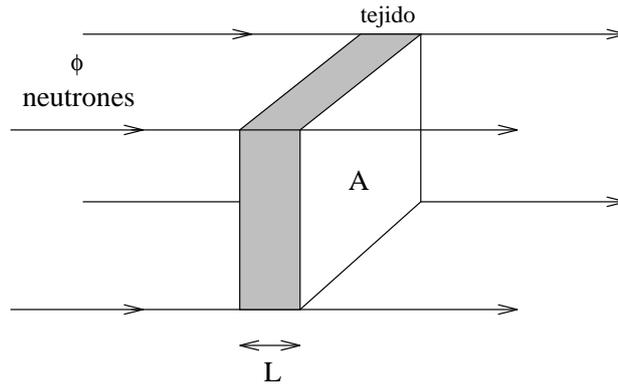


Figura 4: Flujo de energía a través del tejido

Puesto que $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$, se tiene la relación entre el rem y el sievert:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad (13)$$

Deberíamos insistir en este punto, en que la *incertidumbre* reflejada en la determinación del factor de calidad no se debe a la falta de precisión con la que la dosis absorbida puede ser medida. Si la situación lo requiere, las medidas de la dosis absorbida pueden realizarse con bastante precisión. La incertidumbre en Q es un reflejo de la complejidad de los organismos biológicos que absorben dicha dosis. Dicha incertidumbre está presente en todos los procesos que tratan con organismos vivos. Los comentarios que pueden oírse a menudo, del tipo “no sabemos qué efectos tiene la radiación ...” es engañosa. De hecho, se conoce bastante más acerca de las consecuencias de la radiación ionizante que acerca del impacto de muchos otros efectos a que están sujetos los organismos biológicos (como varios tipos de contaminación atmosférica, aditivos alimentarios, etc). Esto no debería sorprender: la presencia e intensidad de la radiación puede medirse más fácilmente y con mayor precisión que la concentración de la mayoría de los polucionantes. Además las consecuencias de la radiación han sido objeto de un estudio sistemático e intensivo.

Ejemplo Un haz de neutrones de $E = 2 \text{ MeV}$ y flujo $2 \times 10^6 \text{ neutrones/cm}^2/\text{s}$ es atenuado un 25 % al pasar por una muestra de tejido de 1.2 cm de espesor. ¿Cuál es la dosis absorbida y la dosis equivalente depositada por el haz? (Indicación: la densidad del tejido que no contenga hueso es de $\sim 1 \text{ gr/cm}^3$).

La situación se ilustra en la figura 4. Consideremos una porción de tejido de área transversal A y longitud $L = 1,2 \text{ cm}$.

El flujo de energía incidente es $\phi_E = E\phi$. La energía que atraviesa por unidad de tiempo una superficie transversal del tejido de área A es:

$$\frac{dE}{dt} = \phi_E A = E\phi A.$$

La energía que absorbe el tejido es un 25 % de la incidente:

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{abs} = \frac{1}{4}E\phi A$$

Esta energía es absorbida por un volumen de tejido $V = AL$, que tiene una masa $m = V\rho$, donde $\rho \sim 1 \text{ g/cm}$ es la densidad del tejido. Dividiendo por esta masa obtenemos la energía absorbida por unidad de masa y por unidad de tiempo, es decir, la tasa de dosis absorbida

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{4} \frac{E\phi A}{V\rho} = \frac{E\phi}{4L\rho}.$$

Su valor numérico es de

$$\frac{dD}{dt} = \frac{2 \text{ MeV} \times 2 \times 10^6 / \text{cm}^2 \text{ s}^2}{4 \times 1,2 \text{ cm} \times 1 \text{ g/cm}^3} = \frac{10^6 \text{ MeV}}{1,2 \text{ g} \cdot \text{s}}$$

Usando $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ se tiene

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1,602 \times 10^{-19} \times 10^{12} \text{ J}}{1,2 \text{ g} \cdot \text{s}} = 1,34 \times 10^{-7} \text{ J/g} \cdot \text{s} = 1,34 \times 10^{-4} \text{ J/Kg} \cdot \text{s}$$

Por lo tanto, tendremos para la tasa de dosis absorbida:

$$\frac{dD}{dt} = 1,34 \times 10^{-4} \text{ Gy/s} = 0,134 \text{ mGy/s} = 0,0134 \text{ rad/s}$$

Para calcular la dosis equivalente debemos conocer el factor de calidad Q para neutrones de 2 MeV. A la vista de la tabla 5, interpolando entre los valores $Q = 11$ y 9 tabulados para las energías de 1 y 2.5 MeV y redondeando, podemos poner

$$Q \sim 10$$

Por lo tanto, tendremos para la tasa de dosis equivalente

$$\frac{dH}{dt} = 1,34 \times 10^{-3} \text{ Sv/s} = 1,34 \text{ mSv/s} = 0,134 \text{ rem/s}$$

En el ejemplo anterior vemos que es necesario conocer la atenuación del haz para calcular la dosis. Este es un parámetro que puede medirse de forma directa. Solo requiere una medida con un instrumento de ionización delante y detrás de la muestra. La razón entre las dos medidas proporciona la atenuación del haz. También es preciso conocer el flujo absoluto ϕ . Esto requiere una calibración del instrumento con una radiación estándar. Nótese, no obstante, que incluso conociendo la intensidad del haz de forma muy precisa, su atenuación no puede ser traducida completamente en energía depositada, ya que algunos de los neutrones atenuados pueden simplemente haberse dispersado, sin llegar a ser absorbidos. Por lo tanto, la evaluación de la dosis requiere considerar en detalle los mecanismos de la interacción. Puesto que esta información no es suministrada en el enunciado del problema, se ha hecho una estimación del “límite superior”. Este es un procedimiento usual en las estimaciones del efecto de la radiación. Es una aplicación directa del dicho “más vale prevenir que curar”.

4.3. Efectos estocásticos y no estocásticos

Ya hemos visto que los distintos tipos de radiación pueden clasificarse de acuerdo con su LET. Otro esquema de clasificación se basa en las consecuencias de la radiación. Así se distingue entre dos amplias categorías: radiaciones estocásticas y no estocásticas.

1. **Efectos no estocásticos (o no probabilísticos).** Son los efectos que se relacionan con la dosis de forma determinista, es decir, si se ha depositado una dosis equivalente suficientemente alta, aparecerán cierto tipo de efectos. Por ejemplo, si una dosis de rayos X excede de 100 rem, se observará un enrojecimiento de la piel, tras cierto nivel de dosis se producen cataratas en los ojos, etc.
2. **Efectos estocásticos (probabilísticos).** Son efectos que pueden aparecer, pero no lo hacen necesariamente. Lo más que se puede decir es que existe una cierta *probabilidad* de que estos efectos se produzcan. Los ejemplos más conocidos son el desarrollo de cáncer y las mutaciones genéticas.

Otro método de clasificación útil considera el mecanismo real por el cual la radiación ionizante afecta al organismo. Se pueden distinguir dos categorías de efectos: directos e indirectos.

1. *Efectos directos.* La energía de la radiación se transfiere a la materia mediante ionización o ruptura de los enlaces químicos. Este proceso crea iones cargados y químicamente activos. El paso de la radiación deja una huella de enlaces moleculares rotos. Este primer paso en la deposición de energía es el efecto directo.
2. *Efectos indirectos.* Los iones dejados en la traza de la radiación se recombinarán posteriormente para formar nuevos enlaces. Esto puede suceder cerca de la huella donde se produjeron o lejos de ella. Si los iones en cuestión tienen una composición que no corresponde a una molécula estable, se denominan “radicales”. Por ejemplo los radicales oxilo (O) e hidroxilo (OH) son suficientemente pequeños como para tener gran movilidad y poder difundirse lejos de la traza de ionización e interactuar químicamente con las moléculas de la célula. Puesto que la recombinación es en cierto modo aleatoria, los compuestos resultantes tendrán un efecto, como mucho, neutro sobre la célula, pero también podría ser dañino. Las consecuencias que se derivan de estas interacciones se denominan efectos indirectos.

La evidencia experimental demuestra que el impacto de los efectos indirectos sobre el tejido biológico es considerablemente mayor que el de los efectos directos. Puesto que los efectos indirectos consisten en recombinación química, no son únicos.

Consideremos ahora cómo los efectos de la radiación afectan a la célula. En primer lugar, puede suceder que la célula muera. Resulta que para matar directamente una célula se necesitan altas dosis de radiación. Por desgracia, esto no significa que las células sean resistentes a la radiación, ya que, aunque la célula sobreviva, pueden alterarse sus funciones biológicas. Este es precisamente el punto débil de las células. Si la célula no es capaz de realizar sus funciones biológicas morirá al poco tiempo (producción de proteínas, capacidad de reproducirse, etc).

Es precisamente la capacidad de reproducirse de las células y organismos multi-celulares la función más sensible a las rupturas causadas por la radiación. Esto es debido a que la reproducción es un proceso muy complejo que requiere el almacenamiento de información que incorpora las “instrucciones” acerca de la estructura y metabolismo de la célula. Es esta información la que puede ser alterada más fácilmente. El organismo como un todo muere, no porque sus células individuales hayan muerto, sino porque no logran reproducirse y reemplazarse.

Esto explica por qué las fatalidades causadas por la radiación no son instantáneas (excepto para grandes dosis) sino que ocurren después de la exposición durante periodos de tiempo de hasta varias semanas, y por qué algunos efectos son estocásticos, mientras que otros no lo son.

También se explica así por qué algunos tipos de células son más sensibles al daño de la radiación que otras. Las células que se reproducen rápidamente muestran una especial sensibilidad a la radiación. En los humanos adultos los dos órganos más sensibles son:

1. Los órganos que producen los componentes de la sangre. Especialmente la médula ósea.
2. La cubierta interior del tracto gastro-intestinal. Este tejido está reproduciéndose continuamente.

La sensibilidad de los organismos multicelulares a la radiación cambia con el tiempo. El periodo de crecimiento es obviamente el de mayor sensibilidad, pues la multiplicación de las células es más rápida. Por esta razón las dosis máximas recomendadas son menores para los niños y mujeres embarazadas.

La alteración de la información genética en la célula no significa necesariamente que las células sean incapaces de reproducirse. La disrupción de la información podría ser sólo parcial, la célula lograría reproducirse, pero la copia podría resultar alterada. Si las células alteradas proliferan más rápido que las normales, pueden desarrollarse cánceres latentes.

Antes de terminar esta sección es apropiado apuntar que la información almacenada en las células es sensible a varios agentes y no sólo a las radiaciones ionizantes. El efecto de una sustancia cancerígena puede explicarse con el mismo modelo que usamos para la radiación: son sustancias que alteran la composición química de las moléculas de la célula que incorporan la información para la reproducción. El efecto final de la radiación es químico, de ahí la dificultad de distinguir entre efectos latentes causados por la radiación y efectos causados por otras fuentes.

4.4. Efectos agudos, latentes y somáticos

4.4.1. Efectos agudos.

Los efectos que grandes dosis de radiación producirán en un corto lapso de tiempo (de horas a meses) son directamente proporcionales a la dosis equivalente y, por tanto, se clasifican como “no estocásticos”.

Así, Las dosis que excedan los ~ 75000 mrem producirán en pocas horas síntomas observables (Síndrome de radiación agudo): náuseas, vómitos, caída del pelo, debilitamiento,

Tabla 6: Respuestas esperadas frente a dosis de radiación agudas en el cuerpo entero

10 000 rem	100 Sv	Muerte en pocas horas por daño del sistema nervioso central
1 200 rem	12 Sv	Muerte en varios días por daño del sistema gastrointestinal
600 rem	6 Sv	Muerte en varias semanas por daño de los órganos donde se forma la sangre
200 rem	2 Sv	Vómitos en dos horas. Vulnerabilidad a las infecciones por la destrucción de glóbulos blancos.
75 rem	0.75 Sv	Debilidad temporal, pero posible recuperación en pocos días.

disminución de los glóbulos blancos. La exposición de los ojos puede producir cataratas. Los síntomas son proporcionales a la dosis equivalente. Por encima de los 200 000 mrem se puede producir la muerte. Pero puesto que distintos individuos poseen distinta sensibilidad, es imposible dar una cifra precisa sobre la dosis necesaria para producir la muerte. Es preferible definir un índice estadístico, denotado D_{50}/T , y definido como la dosis (aplicada sobre todo el cuerpo en un periodo breve de tiempo) necesaria para matar a la mitad de la población en T días.

Por ejemplo, la dosis $D_{50}/60$ es aquélla que matará en 60 días a la mitad de la población que se expuso a ella. Para la mayoría de los mamíferos, dicha dosis es de $\sim 340\,000$ mrem, también para el hombre. La tabla 6 muestra el rango de respuestas a grandes dosis agudas.

4.4.2. Efectos latentes.

Supongamos que una persona ha sobrevivido a una dosis que potencialmente podría ser fatal. Los efectos de la radiación no cesan completamente. Muchos efectos pueden aparecer años después. Estos son los llamados “efectos latentes”, que están bien establecidos para niveles altos de radiación comparados con el fondo normal.

Para dosis agudas que excedan de ~ 100 rem se ha demostrado que la incidencia de cáncer aumenta linealmente con la dosis. Ahora bien, no está claro que dicha dependencia siga siendo lineal para dosis menores, como se ilustra en la figura 5. La cuestión es ¿debe extrapolarse la respuesta linealmente o de alguna otra manera? La forma de dicha extrapolación tiene importantes consecuencias, porque condiciona la estimación de las dosis máximas permisibles. En la práctica, es rara la exposición a altas dosis agudas. La mayor cantidad de datos referidos a grandes dosis con que contamos actualmente, provienen de las bombas en Hiroshima y Nagasaki (incluso teniendo en cuenta el accidente en Chernobyl).

Las más comunes son las exposiciones a dosis pequeñas, del mismo orden de magnitud que las dosis del fondo de radiación natural. Por ejemplo, excepto en áreas de la Unión Soviética, las dosis que causaron mayor preocupación en el resto de Europa tras el accidente de Chernobyl eran en su mayor parte menores que el fondo de radiación natural. El “efecto” de tales dosis es muy difícil de medir experimentalmente. La razón está en que el “ruido de fondo” producido por el fondo de radiación natural no puede ser evitado. Los cánceres pueden ser causados por muchos agentes polucionantes. Además la herencia genética, los

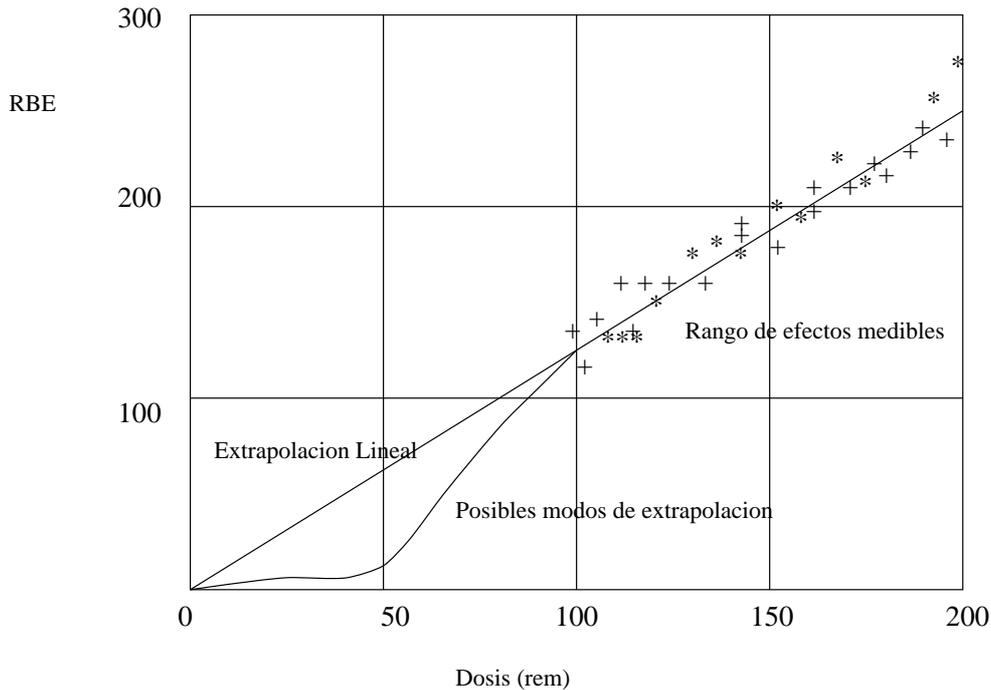


Figura 5: Respuesta latente a dosis agudas.

estilos de vida y otras perturbaciones complican la situación. La tarea de encontrar una correlación entre pequeñas dosis de radiación y un incremento en el cáncer latente es una tarea ardua, si no imposible. Esto ha provocado una controversia entre los que defienden el comportamiento lineal de la figura 5, frente a otros investigadores que argumentan la existencia de evidencia indirecta, respaldada por modelos teóricos razonables, que indica que la extrapolación debería seguir una tendencia por debajo de la extrapolación lineal. También es posible la existencia de una dosis umbral, por debajo de la cual la radiación no produzca daño. Esta teoría se basa en que el sistema de almacenamiento de información en la célula es “redundante” y en la habilidad de las células para reparar pequeños daños. Según esta teoría, la radiación produce daño sólo cuando se exhaustan las estructuras redundantes y se excede la habilidad de la célula para auto-repararse. A partir de este punto el daño empieza a ser lineal con la dosis.

La solución de este problema tendría implicaciones sociales. Las decisiones gubernamentales y la ubicación de instalaciones están basadas en cálculos de los índices de riesgo. La última columna de la tabla 7 representa el coeficiente usado para calcular la probabilidad de muerte por cáncer. La extrapolación lineal incrementa potencialmente los índices calculados. Así, los índices de riesgo de la tabla 7 se basan en la extrapolación lineal. En la actualidad ésta parece ser la forma más prudente de proceder. Sin embargo, esto no la hace la más objetiva. A fin de cuentas, los recursos que la sociedad puede emplear para incrementar la seguridad de los individuos son finitos, y una excesiva inversión en un área significa la reducción de recursos en otra.

Tabla 7: Factor de riesgo estimado para cáncer inducido por la radiación.

Tipo de cáncer	de edad en que se irradió	periodo latente (años)	Periodo de plateau (años)	coeficiente de riesgo (muertes/10 ⁶ /años/rem)
Hueso	0-19.9	10	30	0.4
	20+	10	30	0.2
Esternón	10+	15	30	1.5
Leucemia en útero	0	10	10	15
	0-9.9	2	25	2
	10+	2	25	1
Pulmón, sistema respiratorio	10+	15	30	1.3
Páncreas	10+	15	30	0.2
Estómago	10+	15	30	0.6
Resto del sistema digestivo	10+	15	30	0.2
Tiroides	0+	10	30	0.43
Resto en útero	0	10	10	15
	0-9.9	15	30	0.6
	10+	15	30	1

4.4.3. Efectos genéticos.

El estudio de los efectos genéticos de la radiación es el más complicado, por razones obvias. Es de esperar que la información genética, que permite la supervivencia de las especies, sea especialmente vulnerable a la radiación. Pero los estudios realizados hasta ahora parecen no confirmar esta hipótesis. Tomemos como ejemplo la mayor población que, hasta ahora, ha sido expuesta a grandes dosis agudas — los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki. La tasa de mutación genética de sus descendientes (en la actualidad la tercera generación) no muestra desviaciones estadísticas significativas con respecto a la población japonesa normal (no expuesta a la radiación). Lo mismo ocurre con las poblaciones de Kerala (India) y de algunas regiones de Brasil que han vivido durante años expuestos a un fondo natural de radiación varios órdenes de magnitud superior al medio terrestre. El número de mutaciones genéticas en estos lugares no excede significativamente del de otros lugares con menores niveles de radiación de fondo.

Además, las mutaciones que ocurren en poblaciones expuestas a grandes dosis no se diferencian cualitativamente de las mutaciones estándar que ocurren en otros lugares. Como vemos, este hecho no se ajusta a la imagen que se ha propagado y ha sido explotada por segmentos de la industria del entretenimiento (según la cual, supuestamente las mutaciones causadas por la radiación son únicas e inusuales).

El hecho de que las mutaciones causadas por la radiación no difieran de las “normales” se debe a que éstas son causadas por los efectos “indirectos” de la radiación, que no son distinguibles de otros tipos de influencias “químicas” a las que los genes están expuestos. Desde este punto de vista, la radiación no es algo único e inusual, sino sólo otro componente de un mecanismo genérico.

La otra cuestión ¿por qué no se observa un incremento significativo en la mutación de los descendientes de las poblaciones afectadas por la bomba atómica?, no es tan fácil de contestar. Este hecho está relacionado, probablemente, con el alto grado de redundancia presente en el mecanismo que transfiere la información genética entre las generaciones. De los miles o incluso millones de células idénticas empleadas como “germen”, sólo una se usa en la reproducción. En la competición entre células dañadas y sanas, estas últimas salen victoriosas la mayoría de las veces. Desde este punto de vista, el mecanismo de la redundancia de células germen resulta ser un modo de preservar la información genética.

Para terminar, debemos incidir en que, con los hechos presentados en la presente sección no se intenta subestimar la importancia del peligro potencial de la radiación. Es evidente que el daño que causa una partícula alfa con una energía de 4 000 000 eV que atraviesa una molécula de ADN que está construida con enlaces químicos de menos de 10 eV cada uno, es irreparable. Sus consecuencias (agudas, latentes o genéticas) pueden ser penosas. Por este motivo, los responsables de las instalaciones que utilizan la radiación tienen el deber de utilizar equipos y seguir procedimientos que minimicen las posibles consecuencias producidas por eventos de esta naturaleza.

5. Criterios de protección radiológica (CPR)

5.1. Introducción

A partir del descubrimiento de la radiactividad a finales del siglo XIX se iniciaron nuevos y excitantes campos de investigación, a los que se sumaron un gran número de científicos con gran entusiasmo y poca precaución. Por ejemplo, era usual manejar las fuentes de Ra con las manos y alinear un haz de rayos X con el blanco mirando directamente a la fuente radiactiva. Tras poco tiempo se hizo evidente que la radiación era peligrosa para el tejido biológico. Los primeros síntomas observados eran quemaduras en las extremidades utilizadas. Unos años después se hicieron sentir los efectos latentes, como un incremento del cáncer en los radiólogos. Se comprendió entonces que se requerían precauciones para manejar los radioisótopos.

Al principio las normas de protección eran informales, puesto que involucraban sólo a los científicos. No obstante, a medida que el uso de los rayos X para diagnóstico médico se generalizó, se hizo evidente la necesidad de una serie de reglas más generales. El primer conjunto uniforme de criterios de protección fue elaborado en 1928 por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), que era predominantemente europea. Paralelamente se formó en los Estados Unidos la Comisión Nacional de Protección Radiológica (NCRP).

La proliferación de comités con finalidades similares (y con complejos acrónimos) fue generalizada en aquéllos años (como si el aumento del conocimiento sobre radiación coincidiera con un propensión a nivel mundial de establecer cuerpos reguladores, cada uno requiriendo un conjunto distinto de siglas). Por lo tanto, debemos tener presente que, especialmente en la literatura más antigua, puede encontrarse un gran número de criterios de protección distintos que fueron propuestos en su día por distintos organismos reguladores. Podemos destacar las siguientes características de los mismos:

- Con los años, los criterios se revisaban con una tendencia a disminuir las dosis máximas permitidas.
- Los criterios actuales datan de los años 70, aunque no difieren mucho de los de los años 60.
- Puesto que hay diferentes comités, existen variaciones en los criterios actualmente en vigor.
- Los criterios pueden diferir numéricamente y, en algunos casos, se emplean sistemas de unidades alternativos. Las diferencias no son grandes usualmente (en efecto, a veces puede surgir la sospecha de que los organismos que elaboran los criterios tratan de justificar su existencia modificando ligeramente los criterios de tanto en tanto). Sin embargo, todos suscriben la filosofía de que todas las exposiciones a la radiación deben mantenerse tan pequeñas como sea razonablemente posible.

5.2. Criterios actuales. Radiación externa

Un término antiguo que aún es de uso común es el de *dosis máxima permitida* (DMP). Su uso no es recomendable porque puede ser engañoso en ciertos sentidos. Por citar uno, el adjetivo “permitido” no es del todo adecuado, porque la ley no “permite” dosis, sino simplemente elabora normas de protección. El término “máxima” también es engañoso, puesto que sugiere que una dosis por encima de ésta va a ser repentinamente perjudicial. Sin embargo, no hay evidencia de que la exposición a dosis superiores a las señaladas sea perjudicial. De hecho, ya hemos mencionado que en ciertos lugares del planeta las dosis del fondo natural excede de estos criterios, y también se administran dosis superiores en diagnósticos y tratamientos médicos. Las normas no imponen un límite máximo por encima del cual ocurrirá un daño medible, sino que son pautas para una radioprotección prudente. El término “criterios de protección radiológica” (CPR) (radiation protection guide o RPG, en inglés) es más adecuado.

La elaboración de los CPR es una tarea complicada donde la política juega un papel importante. No obstante los comités que evalúan las recomendaciones para los CPR están formados en su mayor parte por expertos en radiología. Para la elaboración de los CPR se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

1. Existe una relación lineal dosis-efecto para *todas* la dosis de radiación. Esta dependencia lineal puede ser extrapolada a partir de una base de datos establecida para dosis por encima de 100 rads.
2. Las dosis pequeñas suministradas a un órgano son *aditivas*, independientemente de la velocidad o el intervalo de tiempo en que fueron suministradas.
3. No hay recuperación biológica de los efectos de la radiación a pequeñas dosis.

Se han definido dos conjuntos de CPR basados en estas suposiciones: uno para la población en general y otro para trabajadores en contacto habitual con la radiación. En la tabla 8 se presenta una versión abreviada de los mismos.

Las organizaciones o empresas que tratan con radiación poseen comités internos que se encargan de controlar el cumplimiento de los criterios de protección. Se suele adaptar un conjunto de criterios para sus necesidades específicas. Un ejemplo de “manual de protección radiológica” usado en varios establecimientos se muestra en la tabla 9.

Nótese que en la tabla 8 se usa una ecuación para obtener la dosis máxima acumulada H en función de la edad N :

$$H_{max} = 5(N - 18) \text{ rem.} \quad (14)$$

Según esta ecuación resultaría una dosis máxima acumulada de 260 rem para un individuo de 70 años, mientras que según el criterio usado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) la dosis máxima acumulada no puede ser superior a 100 rem. El CPR de 5 rem para la dosis anual externa supone aproximadamente 100 mrem/semana. Una jornada semanal de 40 horas supone una dosis de 2.5 mrem/h. Las áreas en que la tasa de dosis excede de estos valores se consideran áreas restringidas. Bajo ciertas regulaciones, cualquier

Tabla 8: Criterios de protección radiológica (dosis en rem)

Tipo de exposición	FRC/EPA (1960)	EPA (1981)	NCRP (1971)	ICRP (1977)
Exposición ocupacional				
Cuerpo Completo				
Prospectivo	12/a; 3/tr	5/a	5/a	5/a
Retrospectivo	-	-	10-15 cualquier año	-
Hasta N años de edad	$5(N - 18)$	100 en toda la vida	$5(N - 18)$	-
Piel	30/a; 10/tr		15/a	(ver texto)
Manos	75/a; 25/tr	50/a	75/a; 25/tr	(ver texto)
Antebrazos	75/a; 25/tr	-	30/a; 10/tr;	(ver texto)
Gónadas	12/a; 3/tr	5/a	5/a	(ver texto)
Ojos	12/a; 3/tr	5/a	5/a	(ver texto)
Tiroides	30/a; 10/tr	-	15/a	(ver texto)
Cualquier otro órgano	15/a; 5/tr	30/a	15/a; 5/tr	(ver texto)
Mujeres embarazadas	-	†	0.5 gestación	‡
Población en general				
Individuos	0.5/a	-	0.5/a	0.5/a
Promedio	5/30a	-	5/30a	-

† Varios criterios alternativos propuestos

‡ Menos de 0.3 veces la dosis normal ocupacional durante la gestación

Tabla 9: Criterios de exposición externa

Area expuesta	rem por trimestre
Cuerpo completo, cabeza y tronco, órganos productores de la sangre, gónadas, ojos	1.25
Manos y antebrazos, pies y tobillos	18.75
Piel	7.5

habitación o espacio donde una persona pueda ser expuesta a dosis superiores 5 mrem/h se denomina *área radiactiva* y debe ser identificada con las señales de peligro apropiadas.

El uso médico de la radiación es una excepción a estos criterios. Los procedimientos de diagnóstico con rayos X moderadamente intensos pueden producir dosis que exceden estos criterios. Los tratamientos con radiación pueden exceder en varios órdenes de magnitud las dosis recomendadas.

Ejemplo *Un técnico médico maneja una máquina de rayos X de 75 keV. El haz está en funcionamiento durante 0.2 segundos, y en dicho tiempo la exposición es de 200 mR.*

a) ¿Cuánto tiempo puede exponer sus manos el técnico antes de que se absorba su dosis semanal?

b) Estimando una relación exposición/dosis de 1.2 rad/R, ¿qué dosis recibirá un paciente que es expuesto 5 veces durante un procedimiento de diagnóstico?

Adoptando los CPR de la EPA la dosis para las manos es de 50 rem/a, aproximadamente 1 rem/semana.

El haz produce una exposición de

$$\frac{dX}{dt} = \frac{200 \text{ mR}}{0,2\text{s}} = 1000 \text{ mR/s} = 1 \text{ R/s}$$

Ahora necesitamos convertir la exposición en dosis efectiva. Para el tejido blando, 1 R equivale a 0.95 rad (aproximadamente 1 rad). No obstante, la mano se compone también de huesos. El hueso es más denso que el músculo y contiene más elementos pesados, que tienen una sección eficaz fotoeléctrica mayor. Por tanto, es de esperar que el hueso absorba más energía que el músculo para la misma exposición.

La figura 6 representa la relación entre dosis absorbida y exposición para tejido óseo, muscular y graso, es decir, el factor

$$f = \frac{D}{X}$$

en unidades de rad/roentgen. Se observa que, para energías pequeñas la absorción de energía por los huesos es mucho mayor que la absorbida por el músculo. Para $E = 75 \text{ keV}$ el factor $f \sim 2$. En nuestro caso, una estimación de 50 % de hueso y 50 % de músculo para una mano sería apropiada. Por lo tanto, podemos tomar para la mano un factor $f \sim 1,5$.

Esto supone una dosis absorbida por las manos de 1.5 rad/s. Puesto que el factor de calidad para rayos X es de $Q = 1$, la dosis equivalente es de 1,5 rem/s. La dosis semanal de 1 rem se absorberá en $1/1,5 = 2/3 = 0,67 \text{ s}$. Esta es una estimación que muestra las precauciones que deben tomarse al trabajar alrededor de una fuente radiactiva.

En el caso del paciente la dificultad es mayor porque en este caso es el tronco completo el que está expuesto y la composición del tejido variará con la localización y, además, los rayos X se atenúan al atravesar el cuerpo. Por lo tanto, la

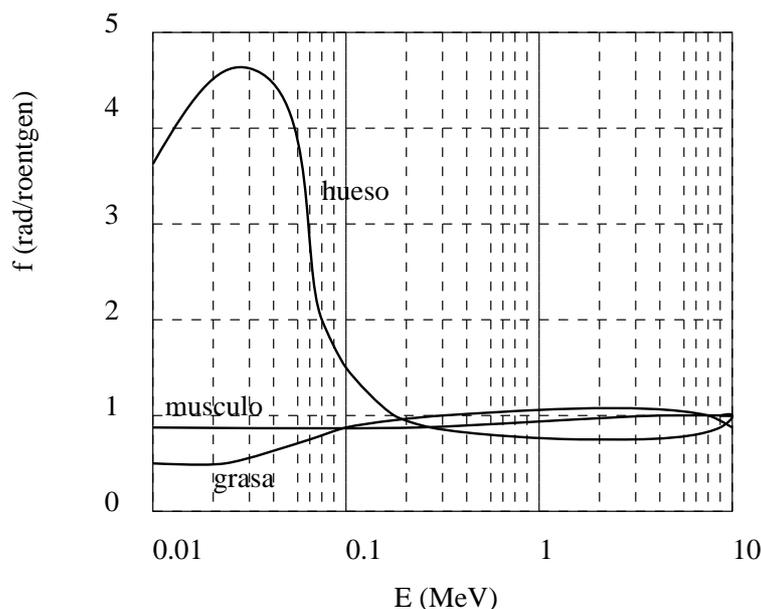


Figura 6: Relación Rad/Roentgen (factor f) para hueso, músculo y grasa.

exposición promediada para el cuerpo completo será menor que la exposición en la superficie. Puesto que el enunciado sugiere que tomemos $f \sim 1,2$ rad/R para el paciente, éste recibirá una dosis de 1.2 rem.

5.3. Fuentes de radiación internas

Los riesgos de irradiación externa están dominados por rayos γ o X y, en casos específicos, neutrones. Esto es debido a que estas radiaciones son muy penetrantes y pueden recorrer grandes distancias en aire. Las partículas cargadas de alto LET raramente constituyen un riesgo por irradiación externa, puesto que que estas partículas sólo se mueven a cortas distancias a través de la materia. Por lo tanto, son atenuadas en aire y son detenidas por la ropa o la piel. El hecho de que interaccionen tanto con la materia permite que puedan ser fácilmente apantalladas, en cuyo caso no constituyen ningún riesgo externo.

La situación cambia completamente si los mismos núcleos radiactivos son ingeridos o inhalados, pues entonces estarán en contacto con órganos muy sensibles y pueden depositar su energía con poca o ninguna atenuación. Por esta razón las dosis efectivas para fuentes de radiación internas requieren métodos de cálculo diferentes y están sujetas a regulaciones especiales.

5.3.1. Factor de energía equivalente efectivo (ξ).

Supongamos que se ha ingerido cierto radioisótopo que en el instante t tiene una actividad $A(t)$ y que emite una energía E por desintegración. Entonces la tasa de emisión de energía es

Tabla 10: Datos físicos y biológicos para radionúclidos internos (ingeridos o inhalados)

Isótopo	Semivida (días)		Organo	ξ (MeV)	q	
	radiactiva	biológica			ingestión	inhalación
^3H (en agua)	$4,5 \times 10^3$	11.9	Cuerpo completo	0.01	1.0	1.0
^{14}C	$2,1 \times 10^6$	10	Cuerpo completo	0.054	1.0	0.75
		40	Hueso	0.27	0.025	0.02
^{24}Na	0.63	11	Cuerpo completo	2.7	1.0	0.75
^{41}Ar	0.076		Submersión [†]	1.8		
^{60}Co	$1,9 \times 10^4$	9.5	Cuerpo completo	2.5	0.3	0.4
^{87}Kr	0.053		Submersión [†]	2.8		
^{90}Sr	$1,1 \times 10^4$	$1,3 \times 10^4$	Cuerpo completo	1.1	0.3	0.4
		$1,8 \times 10^4$	Hueso	5.5	0.09	0.12
$^{131}\text{I} + ^{131}\text{Xe}$	8.04	138	Cuerpo completo	0.44	1.0	0.75
		138	Tiroides	0.23	0.3	0.23
$^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$	$1,1 \times 10^4$	70	Cuerpo completo	0.59	1.0	0.75
		140	Hueso	1.4	0.04	0.03
$^{226}\text{Ra} + \text{hijos}$	$5,9 \times 10^5$	$1,64 \times 10^4$	Hueso	110	0.04	0.03
^{235}U	$2,6 \times 10^{11}$	300	Hueso	230	$1,1 \times 10^{-5}$	0.028
^{239}Pu	$8,9 \times 10^6$	$7,3 \times 10^4$	Hueso	270	$2,4 \times 10^{-5}$	0.2

[†]Valor de ξ para personas rodeadas por nube de gas

$EA(t)$. Si esta energía es en forma de partículas cargadas de corto alcance, entonces puede suponerse que se absorbe en las proximidades de la fuente. Para obtener la tasa de dosis efectiva basta dividir por la masa M del órgano en que tiene lugar la emisión y multiplicar por el factor de calidad Q apropiado

$$\frac{dH}{dt} = \frac{QEA(t)}{M}. \quad (15)$$

En la práctica la situación no es tan simple, pues la mayoría de los isótopos que decaen α o β emiten también rayos γ . La energía de estos gammas sólo se deposita parcialmente en el órgano en cuestión, ya que su camino libre medio es grande en comparación con el tamaño de los órganos humanos. Además, la LET de las α es distinta de la de los electrones emitidos durante la interacción de los γ . La cantidad de energía depositada localmente dependerá entonces de

- El tipo y energía de los productos de desintegración y
- El tipo de órgano (su tamaño y densidad).

Para tener en cuenta estos factores, se introduce el *factor de energía equivalente efectivo*, ξ , definido como el promedio del producto QE por desintegración, y que tiene unidades de energía. Cuando la desintegración involucra varias partículas, el factor ξ incluye la energía absorbida de cada especie multiplicada por correspondiente factor Q . En la tabla 10 se presenta una lista representativa de valores de ξ y otros datos radio-biológicos de utilidad.

Los valores de ξ se dan en la tabla para el cuerpo completo o para órganos específicos. Algunos de los valores son particularmente elevados; por ejemplo, para el Ra-226 se tiene

$\xi = 110$ MeV. Claramente, esto no puede ser el resultado de una única desintegración, sino que es un valor compuesto, que incluye contribuciones de los productos de la desintegración rápida de sus núcleos hijos.

Para una muestra ingerida de actividad $A(t)$ y dado el factor ξ correspondiente, la tasa de dosis absorbida por un órgano de masa M será

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\xi A(t)}{M}. \quad (16)$$

5.3.2. Factor de retención (q).

El valor de $C(t)$, es decir, la cantidad de radioisótopo que reside en el cuerpo o en un órgano dado no es tan fácil de determinar. Esto es debido a que el organismo elimina parte de la materia ingerida y retiene los elementos que son esenciales para sus funciones, que se concentran en órganos concretos. Por ejemplo, el tiroides almacena iodo; el calcio y elementos químicamente similares, como el estroncio, se concentran en los huesos, etc.

La tabla 10 incluye información que permite la estimación de estos efectos. En las dos columnas de la derecha se tabula un factor q que representa la fracción de un isótopo retenida por el cuerpo. Esta fracción es dependiente del método de ingestión. Por ejemplo, el Pu-239 representa un riesgo relativamente pequeño si es ingerido, ya que la fracción de retención es de sólo $2,4 \times 10^{-5}$; sin embargo, cuando el Pu es inhalado, la fracción retenida es de 0.2. Por otra parte, el iodo tiene un factor de retención muy alto (prácticamente igual a 1), con una fracción importante que se acumula en el tiroides.

5.3.3. Vida media biológica.

Cuando un isótopo es ingerido o inhalado, su concentración interna final dependerá del tiempo que es retenido por el cuerpo. La segunda y tercera columna de la tabla 10 proporcionan la información necesaria para estimar la retención efectiva. En la segunda columna aparece un parámetro que ya nos es familiar: la semi-vida del isótopo (denominado “semi-vida radiactiva” en la tabla). Para algunos isótopos la semi-vida es muy corta (por ejemplo, 0.63 d para el ^{24}Na). Por tanto, tras ser ingerido, la concentración de este isótopo decaerá a niveles muy bajos tras varios días aunque no sea eliminado por el organismo. No obstante, la semi-vida de otros isótopos es de miles de días hasta miles de años. Desde nuestro punto de vista, tales isótopos son prácticamente permanentes y su concentración en el organismo se reduce principalmente por eliminación biológica.

La eliminación de un isótopo por medios biológicos puede expresarse en términos de una “vida media biológica”, definida de forma similar a la vida media radiactiva. Esto es así porque los procesos de transporte biológicos para un material dado son aproximadamente proporcionales a su concentración. Si $Q(t)$ es la concentración de cierta sustancia Q en el organismo, ésta disminuye a una velocidad proporcional a su concentración, es decir:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -\lambda_b Q(t), \quad (17)$$

donde λ_b es una constante de deposición biológica. En ausencia de radiactividad, la concentración disminuye exponencialmente

$$Q(t) = Q(0) \exp(-\lambda_b t) \quad (18)$$

La semi-vida biológica se define, pues, como

$$T_b = \frac{\ln 2}{\lambda_b} \quad (19)$$

Este es el valor que aparece en la tercera columna de la tabla 10. Por ejemplo, para el tritio (que es usualmente ingerido con el agua) la semi-vida biológica es relativamente corta ~ 2 días. Para los elementos pesados, que tienden a concentrarse en los huesos, la semi-vida biológica es muy larga.

La tasa de eliminación de un isótopo radiactivo está determinada por una *constante de desintegración total efectiva*, λ_T , que tiene en cuenta ambos procesos (desintegración radiactiva y deposición biológica):

$$\lambda_T = \lambda + \lambda_b. \quad (20)$$

Supongamos que se ha ingerido un isótopo con actividad A_0 que se concentra en un órgano de masa M . La tasa de dosis efectiva que produce en dicho órgano en función del tiempo está dada entonces por

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{q\xi}{M} A_0 e^{-\lambda_T t} \quad (21)$$

La dosis efectiva producida en un tiempo t_1 se obtiene integrando la expresión anterior entre 0 y t_1

$$H = \int_0^{t_1} \frac{dH(t)}{dt} dt = \frac{q\xi A_0}{M\lambda_T} (1 - e^{-\lambda_T t_1}) \quad (22)$$

Ejemplo Una persona ha estado inhalando aire conteniendo ^{131}I durante tres horas. Estimar la dosis total de radiación que habrá recibido en el tiroides transcurridos 30 días y 1000 días. La concentración de I en el aire es de $2,5 \times 10^{-10} \text{ Ci/m}^3$. El tiroides de un adulto pesa aproximadamente 20 g, y la tasa normal de aire inspirado es de $0,835 \text{ m}^3/\text{h}$.

En la tabla 10 se da la semi-vida del ^{131}I como 8.04 d y la semi-vida biológica es de 138 d. La constante desintegración efectiva es de

$$\lambda_T = \frac{\ln 2}{T} + \frac{\ln 2}{T_b} = \frac{0,693}{8,04 \text{ d}} + \frac{0,693}{138 \text{ d}} = 0,0912 \text{ d}^{-1}.$$

En la tabla también aparece el factor de energía efectiva $\xi = 0,23 \text{ MeV}$ y el factor de retención por inhalación de $q = 0,23$ (la igualdad numérica de ambos números es casual).

La actividad total del isótopo inhalado durante las tres horas es de

$$\begin{aligned} A_0 &= 3 \text{ h} \times 0,835 \text{ m}^3/\text{h} \times 2,5 \times 10^{-10} \text{ Ci/m}^3 \\ &= 6,26 \times 10^{-10} \text{ Ci} = 6,26 \times 10^{-4} \mu\text{Ci} \end{aligned}$$

La dosis total recibida en el tiempo t es de

$$H = \frac{q\xi A_0}{M\lambda_T} (1 - e^{-\lambda_T t})$$

Por tanto debemos calcular la dosis

$$\begin{aligned} \frac{q\xi A_0}{M\lambda_T} &= \frac{0,23 \times 0,23 \text{ MeV} \times 6,26 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}}{20 \text{ g} \times 0,0912 \text{ d}^{-1}} \\ &= 0,1816 \times 10^{-4} \frac{\text{MeV} \mu\text{Ci}}{\text{g}} \text{ d} \end{aligned}$$

Ahora debemos transformar las unidades anteriores a unidades de dosis absorbida (rem). Veamos qué valor tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{MeV} \mu\text{Ci}}{\text{g}} &= \frac{1,602 \times 10^{-19} \text{ J} \times 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}}{\text{g}} = 5,92 \times 10^{-9} \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{s}} \\ &= 5,92 \times 10^{-6} \frac{\text{Gy}}{\text{s}} = 5,92 \times 10^{-4} \text{ rad/s} = 51,1 \text{ rad/d} \end{aligned}$$

Por lo tanto, puesto que el factor de energía efectivo ξ ya incluye el factor de calidad, podemos escribir la dosis anterior directamente en rem:

$$\frac{q\xi A_0}{M\lambda_T} = 0,1816 \times 10^{-4} \times 51,1 \text{ rem} = 9,28 \times 10^{-4} \text{ rem} = 0,928 \text{ mrem.}$$

Para un tiempo de $t = 30$ días se tiene

$$\exp(\lambda_T t) = \exp(-0,0912 \times 30) = 0,0648$$

Por lo tanto, la dosis recibida tras 30 días será de

$$H(30 \text{ d}) = 0,928 \text{ mrem}(1 - 0,0648) = 0,868 \text{ mrem}$$

Tras 1000 días la exponencial es prácticamente cero, por lo que se ha alcanzado ya la dosis asintótica

$$H(1000 \text{ d}) = 0,928 \text{ mrem.}$$

5.4. Criterios de protección. Radiación interna

Los efectos de las fuentes internas dependen del isótopo y del tipo de desintegración, de los núcleos hijos que produce, de sus vidas medias radiactiva y biológica, etc. Por esta razón, los criterios de protección radiológica (CPR) para este tipo de fuentes suponen grado de complicación considerable.

En la tabla 11 se muestra una breve relación de CPR para la concentración de los isótopos más comunes en aire y agua (el agua se refiere a cualquier fluido bebible, incluida la cerveza).

Tabla 11: Límites recomendados para la concentración de radioisótopos en aire y agua (en μCi por cm^3)

Isótopo	Exposición ocupacional		Público general	
	aire	agua	aire	agua
^3H	5×10^{-6}	0.1	2×10^{-7}	3×10^{-3}
^{14}C	4×10^{-6}	0.02	1×10^{-7}	8×10^{-4}
^{24}Na	1×10^{-6}	6×10^{-3}	4×10^{-8}	2×10^{-4}
^{41}Ar	2×10^{-6}	*	4×10^{-8}	*
^{60}Co	3×10^{-7}	1×10^{-3}	1×10^{-8}	5×10^{-5}
^{85}Kr	1×10^{-5}	*	3×10^{-7}	*
^{90}Sr	1×10^{-9}	1×10^{-5}	3×10^{-11}	3×10^{-7}
^{131}I	9×10^{-9}	6×10^{-5}	1×10^{-10}	3×10^{-7}
^{137}Cs	6×10^{-8}	4×10^{-4}	2×10^{-9}	2×10^{-5}
^{226}Ra	3×10^{-11}	4×10^{-7}	3×10^{-12}	3×10^{-8}
^{235}U	5×10^{-10}	8×10^{-4}	2×10^{-11}	3×10^{-5}
^{239}Pu	2×10^{-12}	1×10^{-4}	6×10^{-14}	5×10^{-6}

*Los gases nobles no son solubles en agua.

Como muestra la tabla, los valores de los límites recomendados cubren varios órdenes de magnitud. Con gran diferencia, el daño biológico debido a inhalación es mucho mayor que el producido por ingestión. Por ejemplo, el límite recomendado para ^3H (tritio) es cuatro órdenes de magnitud menor en aire que en agua. Esto se debe a que el volumen de aire que el cuerpo necesita es mucho mayor que el de agua, ya que la respiración es continua. Para los isótopos Ar-41 y Kr-86 no se dan concentraciones en agua debido a que son gases nobles y no son solubles.

Otra característica importante de las fuentes internas es que pueden ser “ocasionales” o “crónicas”. Algunos individuos (técnicos radiólogos, mineros) pueden estar expuestos a tomas continuas de radiación (esto es, crónicas). La concentración de los isótopos en sus cuerpos puede alcanzar niveles asintóticos.

Es debido a las condiciones de polución crónicas que ciertos límites recomendados son especialmente bajos (por ejemplo, 10^{-14} en el caso de Pu-239). Aunque la concentración de un isótopo sea muy pequeña, si reside en el aire que respiramos o en el líquido que bebemos, entonces su toma es prácticamente continua. Si además el cuerpo es propenso a retener ciertas especies por largo tiempo (por ejemplo en los huesos) entonces, incluso una concentración muy baja puede llegar a producir dosis notables a lo largo de una vida.