

# ***Protección radiológica en Medicina Nuclear***

---

***Margarita Núñez***

***Escuela Universitaria de Tecnología Médica  
UdelaR, Montevideo, Uruguay  
Comité de Tecnólogos de ALASBIMN***

***2008***

# Protección Radiológica en Medicina Nuclear

## 1. INTRODUCCIÓN:

Los múltiples aspectos de la medida de la radiación y la consecuente protección deben convertirse en la **consideración primaria** toda vez que se utilice material radioactivo. Los efectos reales de la radiación no son completamente conocidos, pero puede decirse en forma general que toda radiación es potencialmente nociva y por tanto deben tomarse los pasos para **prevenir una exposición innecesaria**. Algunos factores a tener en cuenta incluyen

- tipo y energía de la radiación,
- poder de penetración,
- capacidad de ionización,
- vida media física (radioactiva),
- vida media biológica,
- vida media efectiva.

El personal que utiliza material radioactivo debe conocer las distintas unidades de medida de la radiación y reconocer la necesidad de ciertas limitaciones a la exposición a la misma.

El tema de la **protección** en medicina nuclear abarca desde los **mecanismos biológicos** por el cual se produce el daño por radiación y el **cómputo matemático del riesgo**, hasta los detalles más comunes y prácticos de las **medidas simples de protección**, el **monitoreo** de la radiación recibida y la **legislación** existente al respecto.

## 2. MEDIDA DE LA RADIACIÓN.

Básicamente, se utilizan dos parámetros para definir varios términos de la medida de la radiación:

- la **ionización de la materia** producida por la radiación, y
- la **energía** proveniente de la **radiación absorbida** por la materia.

De estos dos conceptos básicos han derivado distintos tipos de medida de la radiación. Se han desarrollado diferentes unidades y medidas por parte de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU) y organismos similares.

Existen tres unidades inconfundibles entre las principales formas de medida de la radiación:

- el **roentgen** o unidad de exposición a la radiación,
- el **rad** o unidad de dosis de radiación absorbida y
- el **rem** o unidad de dosis biológica.

Estas 3 unidades eran utilizadas en el sistema tradicional de medidas y han sido reemplazadas por las unidades del SI. Los conceptos más importantes para determinar los niveles de exposición a la radiación son los siguientes:

**a) Exposición a la radiación:** las radiaciones  $\chi$  y  $\gamma$  tienen la propiedad de **producir iones**, liberando carga eléctrica cuando interactúan con la materia. Un método común de determinar la intensidad de un rayo  $\chi$  ó  $\gamma$  es **medir la magnitud de la carga eléctrica liberada en aire**. La cantidad que representa la magnitud de carga eléctrica por unidad de masa de aire es llamada **exposición**. Para rayos  $\chi$  y  $\gamma$  (fotones), la exposición es precisamente definida en términos de la cantidad de ionización producida en aire por la fuente de radiación. Es medida en unidades de **culombios por kilogramo (C/kg)** de aire a temperatura y presión normal y está directamente relacionada con el **flujo** de radiación (rayos  $\chi$  o  $\gamma$  por unidad de área) y con la **energía** de la radiación (energía de rayos  $\chi$  ó  $\gamma$  incidentes en la unidad de área). La unidad sustituye al

*roentgen* usado en el sistema tradicional. Existen dos ítems importantes a considerar en la definición de la medida de exposición:

- primero, la unidad de exposición mide la exposición total y no tiene en cuenta el tiempo durante el cual se ha administrado esta exposición;
- segundo, este concepto sólo se aplica para radiación ionizante electromagnética en aire.

Como una alternativa a la unidad de exposición a la radiación, se utiliza el *kerma* en aire, acrónimo para indicar la energía cinética liberada por unidad de masa. Una unidad de kerma en aire representa la transferencia de 1 joule por kilogramo desde el haz de radiación al aire.

**b) Dosis absorbida (D):** fue desarrollada para brindar una medida de la radiación no limitada a los fotones y en un medio cualquiera en vez de aire. Es una medida de la *cantidad de energía* impartida a la materia por *cualquier tipo de radiación ionizante por unidad de masa del material irradiado* en un punto de interés.

Dos consideraciones a tener en cuenta: este concepto se aplica a todas las categorías de dosimetría, a todos los materiales y a todas las formas de radiación ionizante, y es solamente una medida de la *energía absorbida por el material de interés* y no está directamente relacionada con la cantidad e intensidad del campo de radiación.

La unidad del SI es el *gray (Gy)* que es definido como la energía depositada por 1 joule por kg de material. La unidad tradicional es el rad y 1 Gy equivale a 100 rads. La mayoría de las dosis encontradas en el diagnóstico por imágenes son del orden del mGy o  $\mu$ Gy. Si se conocen las características de atenuación del material absorbente, la dosis absorbida puede ser calculada de la exposición a la radiación y viceversa.

**c) Efectividad biológica relativa (RBE):** es un término utilizado para indicar que los diferentes tipos de radiación tienen distintos efectos en el material biológico. Más específicamente, es la relación entre la dosis absorbida de rayos  $\chi$  ó  $\gamma$  y la dosis absorbida de cualquier radiación requerida para producir un efecto biológico idéntico.

Aunque todas las radiaciones ionizantes son capaces de producir efectos biológicos similares, el efecto varía de un tipo de radiación a otra basado en la dosis absorbida.

Esta RBE de radiaciones ionizantes físicamente diferentes dependerá únicamente del *número de eventos ionizantes*, comúnmente referido como *transferencia lineal de energía (LET)*. Dado que la LET es función de la *carga y velocidad* de la partícula ionizante, se requiere menos radiación  $\alpha$  que  $\chi$  ó  $\gamma$  para producir el mismo efecto biológico.

**d) Dosis equivalente (H):** es una cantidad que toma en cuenta el *daño biológico* producido en un tejido por diferentes tipos de radiación. Aún cuando la energía depositada es igual a nivel macroscópico (o sea que la dosis absorbida es la misma), los diferentes tipos y energías de radiación producirán diferente daño biológico. El daño producido por determinada cantidad de *grays* dependerá de la *LET* de la radiación o densidad de ionización producida a nivel microscópico por cada partícula de radiación en su trayecto a través de los tejidos.

La dosis equivalente es obtenida multiplicando la *dosis absorbida* por un *factor de peso* de la radiación, el cual tiene en cuenta el *RBE* de cada tipo de radiación. A las radiaciones de baja LET incluyendo rayos  $\chi$  y  $\gamma$  de todas las energías, se les asigna un factor de peso de radiación de 1. Los factores de peso para otras radiaciones están basados en los valores de sus RBE observados. La unidad de dosis equivalente es el joule por kilogramo y se llama *sievert (Sv)*, que reemplaza al *rem* en el sistema tradicional. Un Sv equivale a 100 rem.

Para las radiaciones ionizantes utilizadas en imagenología médica, el factor de peso de las radiaciones es igual a 1, por lo tanto *la dosis equivalente en Sv es numéricamente igual a la dosis absorbida en Gy*. La mayoría de las dosis equivalentes encontradas en procedimientos diagnósticos imagenológicos estarán en el orden de los *mSv o  $\mu$ Sv*.

**e) Dosis equivalente efectiva (E):** la dosis de radiación impartida a varios órganos del cuerpo debido a irradiación externa o a la presencia de radioactividad interna puede variar

considerablemente dependiendo del tipo de radiación y, en los casos de radioactividad interna, de las características biológicas del material.

La ICRP ha desarrollado el **parámetro de riesgo** relacionado para describir el efecto general de la distribución de dosis no homogénea, teniendo en cuenta la **radiosensibilidad relativa** de cada órgano y tejido. La **dosis efectiva** es obtenida calculando un promedio pesado de la dosis equivalente recibida por cada órgano y tejido que haya sido irradiado. Los órganos o tejidos que tengan mayor riesgo por radiación tendrán un factor de peso mayor. La dosis efectiva se expresa también en **sievert (Sv)**.

La dosis efectiva es similar, en términos de riesgo general, a una **exposición uniforme de cuerpo entero** en la cual cada órgano recibe una dosis equivalente igual a la dosis efectiva. Esto es utilizado extensamente en protección radiológica y es también útil para categorizar los procedimientos diagnósticos imagenológicos.

### 3. FUENTES DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN.

Es importante recordar que el ser humano ha existido siempre en un ambiente que incluye exposición a las radiaciones ionizantes. Efectivamente, una gran proporción de la dosis efectiva anual recibida por la población resulta de la **radiación natural** proveniente del medio ambiente (aproximadamente 86% de la dosis anual mundial per capita), esta dosis varía de un sitio a otro dependiendo de la altitud y de la abundancia de minerales radioactivos naturales en las rocas y el suelo. Adicionalmente, un 14% de la exposición anual promedio es creada por el hombre, de la cual un 10% es debida al uso de rayos  $\chi$  diagnósticos y un 4% debida a procedimientos de medicina nuclear. Existe además un pequeño porcentaje aportado por fuentes misceláneas de radiación como pueden ser armas nucleares, combustibles, etc.

**a) Tipos de emisión radioactiva.** En medicina nuclear existen 3 tipos de emisión que nos preocupan primariamente, partículas  $\alpha$ , partículas  $\beta$  y rayos  $\gamma$ . Existen además rayos  $\chi$  resultantes de varios fenómenos de interacción con la materia. Algunos de ellos tienen gran impacto en la dosimetría del paciente, como los rayos  $\chi$  característicos del mercurio provenientes de la desintegración del talio 201, mientras que otros son muy débiles y no poseen consecuencias en términos de radioprotección.

Un factor a ser considerado es la emisión **externa** versus la **interna**, o sea que la radiación provenga de afuera y penetre la epidermis hacia el cuerpo, o que la radiación ya esté dentro del organismo luego de haber sido ingerida, inhalada o inyectada por vía intravenosa. Los rayos  $\chi$  y  $\gamma$  son capaces de penetrar la epidermis y por tanto representan el mismo daño ya sean emisores internos o externos. Este no es el caso de los emisores  $\alpha$  y  $\beta$ , los cuales normalmente no pueden atravesar la capa más externa de la piel. Como emisores externos usualmente no constituyen un problema serio con la radioprotección, sin embargo como emisores internos la amenaza del daño por radiación se vuelve severo.

- El poder de penetración de una **partícula  $\alpha$**  es muy pobre, ya que normalmente una hoja de papel puede detenerla. Se requiere una partícula  $\alpha$  con una energía de 7.5 MeV para penetrar la piel humana.

- El poder de penetración de la **partícula  $\beta$**  es del orden de 100 veces mayor que el de la  $\alpha$ , y se requiere una pulgada de madera o  $\frac{1}{4}$  de pulgada de aluminio para frenarla. Aunque como emisor externo no es considerado de importancia en términos de radioprotección, **una partícula  $\beta$  puede penetrar la piel desde algunos mm hasta 1 cm**. Existe una rápida desaceleración de la partícula como consecuencia de la interacción con el tejido.

- Los **rayos  $\gamma$**  tienen un poder de penetración **muy alto** y pueden producir daños por radiación tanto como emisores internos o externos. En términos de protección, se requiere plomo o concreto para poder frenar un fotón  $\gamma$ . En contraste a la absorción total de la partícula  $\alpha$  ó  $\beta$ , solo un 3 % de la energía del rayo  $\gamma$  es absorbido en 1 cm de tejido, el resto es absorbido en un volumen mayor de tejido o atravesando e interaccionando completamente fuera del cuerpo.

Se cree que la **ionización en el tejido**, ya sea directa o indirectamente, es la interacción biológica más importante de la radiación. La mayoría del daño producido en los tejidos es

consecuencia de este fenómeno. La capacidad de ionizar varía tremendamente entre partículas  $\alpha$  y  $\beta$  y emisiones  $\gamma$ ; un término que se utiliza para describir este fenómeno es la **ionización específica** que es el **número promedio de pares de iones que son producidos por unidad de distancia** viajada por la radiación incidente.

Existe una correlación importante entre la capacidad de ionización y el poder de penetración de varias emisiones. Las partículas  $\alpha$  son débiles en su poder de penetración pero su poder de ionización alcanza proporciones tremendas. Si las partículas  $\alpha$  sortean la epidermis, representan un grave problema en términos de radiación biológica. Esto es también cierto para los emisores  $\beta$ , pues aunque no tienen un poder de ionización tan grande poseen mayor capacidad de penetración. Sin embargo, su penetración no es tan importante como para atravesar mucho más allá de la piel. Basados en su poder de ionización, los emisores  $\beta$  pueden causar un tremendo daño biológico siempre que la protección de la piel sea sorteada. Los emisores  $\beta$  son utilizados para **terapia** basados únicamente en su habilidad para la **destrucción localizada de tejido funcional**. Dado que muchos radionucleidos son emisores  $\beta$  y  $\gamma$ , los componentes  $\beta$  representan la mayor contribución de dosis de irradiación como emisor interno.

**b) Tipos de exposición radioactiva.** En un servicio de medicina nuclear, dado que se utilizan fuentes radiactivas abiertas (o no selladas), existe posibilidad de **exposición** a la radiación tanto **externa** como **interna**.

- La **exposición externa** puede ser por fuentes selladas o abiertas. Las **fuentes selladas de radionucleidos de larga vida media** son usadas en medicina nuclear sólo como **patrones de referencia para calibración** de los instrumentos. Se trata de **fuentes de exposición externa** solamente, pero aquellas que contienen líquidos deben ser revisadas periódicamente para confirmar que no constituyen peligro de contaminación. Las fuentes de exposición externa más comunes están en realidad constituidas por las **dosis de radiofármacos** y los **pacientes** a los cuales se han administrado las mismas para ser estudiados o tratados.

- La **exposición interna** del personal es muy poco frecuente en la rutina diaria. En general el derramado de sustancias radiactivas que puede provocar contaminación proviene de: pérdidas durante la administración del radiofármaco, fluidos corporales del paciente, especialmente orina, saliva y vómitos y goteo o daño del contenedor de la fuente. La contaminación radiactiva del aire puede ocurrir cuando se abre un vial conteniendo Iodo 131 (sustancia muy volátil), o cuando se realizan estudios de ventilación pulmonar por inhalación de aerosoles o gas de  $^{99m}\text{Tc}$ .

#### 4. GUÍAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) es un cuerpo internacional de expertos en radiación los cuales examinan y reportan los asuntos de protección radiológica. Durante muchos años desde su inicio (1928), la ICRP ha desarrollado un **sistema de protección radiológica** que se ha difundido y ha ganado aceptación; sus guías y recomendaciones forman las bases de la legislación en muchos países. La filosofía general del sistema de protección de la ICRP puede ser resumido bajo 2 categorías: prácticas e intervención.

**a) Prácticas** (usos actuales y propuestos de la radiación): el uso de la radiación debe estar sujeto a tres criterios principales:

- **Justificación:** el beneficio neto del individuo o la sociedad expuesta a la radiación debe al menos compensar el daño de la radiación.

- **Optimización:** la cantidad de exposición y la cantidad de personas expuestas deben mantenerse **tan bajas como sea razonablemente posible** teniendo en cuenta los factores sociales y económicos (principio de ALARA). ALARA es un acrónimo cuya base es la frase “as low as reasonably achievable”.

- **Limitación:** la exposición de los individuos, excluyendo los de la práctica médica, debe estar sujeta a dosis límites. El riesgo (probabilidad y detrimento) de exposiciones potenciales debe ser controlado.

**b) Intervención** (medidas para reducir la exposición de fuentes de radiación existentes): esto debe estar sujeto a un criterio similar.

- **Justificación:** el efecto potencial de la intervención propuesta debe minimizar cualquier efecto dañino posible y costos económicos.

- **Optimización:** la intervención propuesta debe ser optimizada en términos de forma, escala y duración.

El bloqueo farmacológico de la tiroides para evitar una captación indeseada de radioyodo, es un ejemplo de intervención.

## 5. MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.

El personal involucrado en el uso de material radioactivo debe seguir siempre **medidas de protección radiológica**. No se conoce aún con total exactitud el efecto de las radiaciones, pero asumiendo que todas las radiaciones ionizantes son potencialmente dañinas, debemos estar constantemente en alerta respecto a los métodos de protección. Existen limitaciones prácticas establecidas por las comisiones nacionales e internacionales para proteger a los trabajadores ocupacionalmente expuestos. La racionalización de estos límites se basa en que aún los usos pacíficos de la energía atómica requieren cierta exposición a la radiación y a que es imposible blindar completamente a los trabajadores. Por esta razón, el personal de medicina nuclear debe estar constantemente alerta sobre los métodos prácticos de radioprotección. Estos métodos son: **distancia, blindaje y tiempo**. Mediante el uso adecuado de estos 3 métodos, el nivel de radiación a la cual el trabajador está expuesto puede ser mantenido en un mínimo y dentro de las limitaciones recomendadas.

**a) Distancia:** constituye uno de los mejores métodos de radioprotección y es uno de los más utilizados en la rutina diaria; no solamente es un procedimiento efectivo de protección sino que es también el más barato. Cuando un individuo se aleja de la fuente radioactiva es natural esperar recibir menos radiación, y podría pensarse que si se duplica la distancia se recibiría la mitad de la radiación; sin embargo en realidad la persona recibirá un cuarto de radiación. Esto se conoce como la **ley del cuadrado inverso de la distancia**, la cual establece que la cantidad de radiación recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente. Duplicando la distancia la dosis es  $\frac{1}{4}$  de la original, reduciendo la distancia a la mitad la dosis será 4 veces mayor a la original.

La ley del cuadrado inverso se aplica con mayor exactitud para **fuentes puntuales emisoras  $\gamma$** , no para fuentes mayores o múltiples fuentes. Esta ley explica la sugerencia del uso de pinzas largas o controles remotos para mantenerse **tan alejado como sea posible** de la fuente emisora.

**b) Tiempo:** el principio del tiempo es también un método práctico de radioprotección. Cuanto más tiempo se exponga un individuo a un campo de radiación, mayor será la exposición total. El sentido común indica que **el tiempo debe ser utilizado** como control de la exposición a la radiación. En las aplicaciones diagnósticas de medicina nuclear el tiempo no es un factor tan importante como cuando se trata de aplicaciones terapéuticas.

A este respecto, existen tres grupos de personas no ocupacionalmente expuestas que merecen especial consideración: **personal de enfermería, visitas y pacientes adyacentes**, para los cuales la dosis no puede exceder de **1 mSv por año** o de **0.02 mSv en una hora**.

**b) Blindaje:** es también un método práctico de radioprotección. El uso de materiales blindantes como las láminas o ladrillos de plomo no es nada nuevo para los trabajadores de medicina nuclear. El blindaje es simplemente un objeto usado para prevenir o reducir el pasaje de radiación. En el caso de las partículas  $\alpha$  ó  $\beta$  se requiere muy poco blindaje para absorber completamente las emisiones. La práctica general es usar blindaje suficiente para **absorber completamente** las partículas  $\alpha$  y  $\beta$ , sin embargo esto no es verdad para la radiación  $\chi$  ó  $\gamma$ , ya que para estos dos tipos de emisión se utiliza blindaje para **reducir** la cantidad de radiación.

El blindaje en el caso de las partículas  $\beta$  merece una consideración especial. Es bien conocido que  $\frac{1}{4}$  de pulgada de plástico puede frenarlas con lo cual la propia jeringa constituiría un blindaje apropiado, sin embargo si colocáramos una jeringa conteniendo P-32 frente a un detector de centelleo veríamos que este recibe un considerable número de cuentas. En realidad, el detector estaría registrando radiación electromagnética proveniente del bremsstrahlung (radiación de frenado). Para que la radiación sea completamente absorbida o reducida en intensidad, se debe **perder la energía** generada por la propia radiación.

- La energía de las **partículas** cargadas es perdida primariamente por una serie de eventos de **ionización o excitación de los átomos** dentro del propio medio de blindaje.
- La energía de la **radiación electromagnética** es perdida de 3 formas:
  - **efecto fotoeléctrico**,
  - **efecto Compton** o
  - **producción de pares**, dependiendo de la energía de la radiación.

Para rayos  $\gamma$  con energías menores a 1.02 MeV, el proceso de absorción en general ocurre por **colisiones Compton** sucesivas durante las cuales la energía va disminuyendo gradualmente. Eventualmente, la energía de la radiación estará suficientemente disminuida para que pueda darse la absorción total por efecto fotoeléctrico. Para aquellos fotones  $\gamma$  con energías mayores de 1.02 MeV, ocurrirá predominantemente la formación de pares con la eventual generación de dos rayos  $\gamma$  de 511 KeV, los cuales serán absorbidos por interacciones Compton y por efecto fotoeléctrico.

En lo que se refiere al material de blindaje, la **densidad** y el **espesor** del mismo van de la mano para reducir la intensidad de la radiación. Si se coloca entre la fuente y el detector un material de 1 cm de espesor y 10 gr/cm<sup>3</sup> de densidad, tendrá el mismo poder de frenado que si se coloca en el mismo sitio un material de 10 cm de espesor y 1 gr/cm<sup>3</sup> de densidad. Por esta razón, se han comenzado a aceptar las **unidades de "espesor densidad"** que se expresan en **gr/cm<sup>2</sup>**.

Sin embargo, el tema del blindaje es bastante más complicado que el simple concepto de espesor y densidad. Se sugiere que existe una relación directa entre densidad y número atómico (Z). En general es verdad que a mayor número atómico mayor densidad de material y viceversa, pero existen varias excepciones a esta regla, de las cuales el oro (Au) y el plomo (Pb) son buenos ejemplos. El Au tiene un Z de 79 y una densidad de 19 gr/cm<sup>3</sup> mientras que el Pb tiene un Z de 82 y una densidad de 11 gr/cm<sup>3</sup>. Además, la densidad cambia cuando el material cambia de estado físico y su número atómico continúa siendo el mismo, de lo cual un buen ejemplo es el agua cuyo número atómico efectivo es 7.4 pero asume diferentes densidades dependiendo de su estado físico (líquido, sólido o gaseoso).

## 6. COEFICIENTES DE ATENUACIÓN.

Cualquier discusión sobre blindaje debe considerar unidades para medir la cantidad de radiación que es absorbida (atenuada) por un medio absorbente; estas unidades miden parámetros como el **coeficiente de atenuación lineal** y el **coeficiente de atenuación másico**. La diferencia entre ellos es que éste último considera la **densidad** del medio de atenuación.

**a) El coeficiente de atenuación lineal ( $\mu$ )** es definido como la fracción del número de fotones que es eliminada del campo de radiación por centímetro de medio absorbente. Se expresa como una constante del porcentaje de fotones absorbido, similar a la constante de decaimiento  $\lambda$  en la fórmula de vida media física. Una condición con un valor de  $\mu$  de 20% por centímetro (0.20 cm<sup>-1</sup>) indicará que el número de fotones en un haz será reducido en intensidad en un 20% por cada centímetro de medio absorbente. El valor de  $\mu$  es **específico para la energía del fotón y el tipo de absorbente**, si cualquiera de ellos se modifica, el coeficiente de atenuación lineal también cambiará.

**b) El coeficiente de atenuación másico ( $\mu/\rho$ )** es obtenido **dividiendo el coeficiente de atenuación lineal** por la **densidad del medio absorbente**. La unidad se expresa en **cm<sup>2</sup>/gr**.

Volviendo al ejemplo del agua, dado que ésta tiene una densidad del orden de la unidad,  $\mu$  y  $\mu/\rho$  son iguales. Dado que la densidad cambia con los diferentes estados físicos del agua, el **coeficiente de atenuación lineal** cambiará también; la razón es que la atenuación por el absorbente se modifica y esta unidad refleja solamente la atenuación por el medio absorbente por centímetro. Esto contrasta con el **coeficiente de atenuación másico**, el cual permanece igual **independientemente de los cambios físicos del medio**. La razón es que la unidad refleja la densidad del medio absorbente total y no sólo el espesor. Se puede decir entonces que el agua líquida, en forma de hielo o vapor absorberá la misma cantidad de fotones **por gramo**. Esta relación no es importante en medicina dado que el tamaño de los órganos humanos no permiten este tipo de consideraciones, más aún, dado que el coeficiente de atenuación másico permanece igual para todas las formas físicas del agua sin importar su densidad o volumen, el coeficiente de atenuación másico pierde relevancia y por eso **la fórmula de blindaje sólo utiliza el coeficiente de atenuación lineal**.

$$\text{Fórmula de blindaje: } I = I_0 e^{-\mu x}$$

Donde: **I** es la intensidad de la radiación después del blindaje, **I<sub>0</sub>** es la intensidad de la radiación antes del blindaje,  **$\mu$**  es el coeficiente de atenuación lineal en  $\text{cm}^{-1}$  y **x** es el espesor del blindaje en cm. El signo (-) del exponente significa que la intensidad **decrece**. Si bien la fórmula no es de mayor importancia en la práctica diaria, hace posible **predecir la atenuación de los fotones  $\gamma$** .

Está establecido que la radiación  $\chi$  y  $\gamma$  puede ser disminuída a niveles aceptables pero teóricamente **no puede ser llevada a 0**, aunque puede ser reducida en una manera predecible y de ahí surge el concepto de **capa hemirreductora (HVL)**. Por definición, la HVL es el **espesor de un material en particular necesario para reducir la intensidad de la radiación a la mitad de su valor original**. Existen tablas que muestran los valores de HVL para distintos radionucleidos y para diferentes materiales, las cuales constituyen una ayuda rápida para calcular el blindaje necesario para reducir la intensidad de la radiación a niveles recomendados.

El límite estándar aceptado es **2 mrem/h a 1 metro** de la fuente. Si multiplicamos esta dosis por 50 horas de trabajo semanal y 50 semanas por año, nos dará una **tasa de exposición anual de 5 rem/año**.

## 7. CONTROL DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN DEL PERSONAL.

Dado que el riesgo biológico está directamente relacionado con la dosis de radiación a los tejidos, la absorción de material radioactivo debe estar restringida.

**a) Control de la exposición interna.** La mayoría de los radionucleidos que se utilizan en medicina nuclear son considerados leve o moderadamente tóxicos con respecto a contaminación interna, sin embargo, una excepción significativa de  $^{131}\text{I}$  es considerada altamente tóxica debido a su especificidad por la glándula tiroides.

La exposición interna por ingestión, inhalación o absorción dérmica puede ser satisfactoriamente controlada por prácticas simples y sistemáticas que incluyen:

- vestir túnica o delantal que proteja la ropa en toda área en que se manejen fuentes radioactivas abiertas. Esas prendas protectoras deben ser retiradas antes de abandonar el área apropiada para su uso.
- utilizar guantes en todo momento que se manipule material radioactivo.
- no comer, beber, fumar o aplicar cosméticos en áreas en las cuales se utilice o almacene material radioactivo.
- no almacenar alimentos, bebidas o artículos personales en áreas en las cuales se utilice o almacene material radioactivo.
- no utilizar la boca con ningún tipo de instrumento tales como pipetas para fraccionar o medir material radioactivo.



- mantener el área de trabajo libre de contaminación. Realizar semanalmente tests para identificar áreas que requieran descontaminación.

**Manejo del 131I:** deben tomarse precauciones especiales para su uso. Una contaminación interna con 131I resulta en una dosis equivalente de radiación para la tiroides de aproximadamente **52 mSv por  $\mu$ Ci** debido a la exposición y a la captación biológica. Es muy importante tomar precauciones cuando se maneja radioyodo para minimizar el riesgo de contaminación interna, lo cual es particularmente importante cuando se utiliza el radionucleido en forma de solución.

***Recomendaciones prácticas para el manejo de 131I:***

- Abrir el vial en una campana de extracción. El componente volátil siempre está en equilibrio con la actividad de la solución en el vial. ***La causa primaria de contaminación del personal es la inhalación de la nube de radioyodo que escapa del vial al abrirlo.***
- Siempre que sea posible, almacenar los viales en la heladera y en la oscuridad. El componente volátil puede ser minimizado manteniendo la solución a una temperatura menor que la temperatura ambiental, la luz brillante o solar incrementa este componente.
- Utilizar guantes siempre que se maneje radioyodo. El yodo puede penetrar parcialmente los guantes desechables y ser absorbido a través de la piel, por esa razón se recomienda usar ***dos pares de guantes*** cuando se manejan cantidades mayores a 10 mCi.
- Ser muy cuidadoso de ***no tocarse*** el cuello u otras áreas de la piel o la vestimenta cuando está manejando radioyodo.
- Mantener la solución de 131I de desecho en ***contenedores bien tapados***, con tapas ajustadas y a un ***pH básico*** para reducir la volatilidad.

**b) Control de la exposición externa.** La ***exposición externa*** puede ser controlada por los métodos clásicos de: ***minimizar el tiempo, maximizar la distancia y utilizar blindajes.***

- El factor ***tiempo*** puede ser efectivamente utilizado llevando a cabo procedimientos tan eficientemente como sea posible. Los procedimientos nuevos deben ser practicados con material no radioactivo de forma que se adquiera experiencia para poder realizarlos de la manera más rápida posible. Por otro lado, el intentar realizar los procedimientos de forma demasiado rápida puede resultar en derramamientos u otros accidentes que aumentarán el tiempo de exposición.

- En la práctica, se pueden lograr ***distancias*** de trabajo seguras en varios aspectos, manejando los viales con pinzas, almacenando el material radioactivo de desecho en áreas alejadas a las áreas de tránsito del personal, manteniendo la mayor distancia posible con los pacientes inyectados durante los procedimientos.

- En cuanto a los blindajes, se deben usar ladrillos de plomo, vidrio plomado, protectores de jeringa, contenedores para el almacenaje de material de desecho, valijas plomadas para el transporte de dosis, etc.

Aunque en la rutina de trabajo en medicina nuclear se utilizan distintos tipos de radionucleidos, el problema de la exposición externa está dado en un 90% por el 99mTc y ***la principal fuente de exposición es la radiación proveniente de los pacientes inyectados para los procedimientos imagenológicos.*** La relación de exposición típica es:

- 10-15% por preparación de la dosis,
- 10% por la administración de la inyección,
- 75-80% por el procedimiento de imagen.

Esto implica que una fracción sustancial de la dosis anual de cuerpo entero del tecnólogo es debida a la ***presencia cerca del paciente durante la realización del estudio.*** Este componente puede ser reducido en la práctica manteniendo una mayor distancia con el paciente o interponiendo un blindaje entre el paciente y el tecnólogo. También el uso de blindaje para la

jeringa reduce considerablemente la dosis en manos y dedos durante el procedimiento de inyección.

## 8. DERRAMAMIENTOS, ACCIDENTES Y SITUACIONES ESPECIALES.

a) **Derramamiento de material radioactivo.** La emergencia por radiación que ocurre más frecuentemente en un servicio de medicina nuclear involucra un *derramamiento* de material radioactivo. En las áreas donde se trabaja con fuentes no selladas, deben existir instrucciones sobre las medidas a tomar en caso de un accidente incluyendo a quien se debe notificar al respecto. En resumen, las medidas apropiadas deben incluir lo siguiente:

- Desalojar – notificar a todas las personas presentes que evacuen el área.
- Notificar o reportar el incidente a un superior.
- Prevenir la diseminación – cubrir el derramamiento con material absorbente, evitar el movimiento del personal potencialmente contaminado.
- Solicitar ayuda (si es un derramamiento mayor) – asegurar el área y requerir instrucciones al responsable de radioprotección.
- Descontaminar el personal – despojar las ropas contaminadas y depositarlas en una bolsa plástica, descontaminar al personal utilizando agua y detergente en las zonas afectadas. Se ha demostrado poca diferencia de efectividad entre el uso de agua y detergente y los descontaminantes comerciales. No se debe usar ninguna sustancia abrasiva o solventes orgánicos ya que la irritación de la piel puede aumentar la absorción del contaminante.
- Descontaminar el área donde se produjo el derramado – comience la limpieza del área tan pronto como pueda, use guantes desechables y si es posible pinzas largas. Comience desde la periferia hacia el centro, reduciendo sistemáticamente el área contaminada. Coloque todo el material utilizado en una bolsa plástica.
- Monitorear el área con un detector – continuar la limpieza del área hasta que la actividad residual sea aceptable.

Es recomendable que exista una bandeja con elementos de descontaminación y que la ubicación de la misma esté especificada en las instrucciones; se recomienda también que las instrucciones describan la localización de la ducha más cercana que pueda ser usada por el personal para descontaminación.

### b) La paciente embarazada.

Una de las preocupaciones habituales en medicina nuclear es si debe o no realizarse un procedimiento a una *paciente embarazada*. El riesgo del feto a la exposición de la radiación debe ser evaluado contra el beneficio potencial del estudio y el riesgo normal de moralidad del embarazo y la infancia. La primera decisión es confiar en otra investigación clínica que no utilice radiación ionizante. Alternativamente, el estudio puede ser realizado si el riesgo adicional de exposición a la radiación es contrarrestado por el beneficio potencial que la información del estudio puede brindar. En este caso se deben tomar los pasos para *minimizar la exposición del embrión o el feto*. Por ejemplo:

- Diferir el estudio hasta una etapa de gestación avanzada cuando el riesgo sea menor.
- La cantidad de actividad utilizada debe ser reducida al mínimo requerido para obtener un estudio de adecuada calidad. Cualquier dosis al feto que exceda 0.5 mSv requiere cuidadosa justificación y el estudio no debe resultar en una dosis absorbida mayor de 1-2 mSv.
- Cuando el radiofármaco sea excretado por los riñones, la paciente debe ser bien hidratada y debe orinar frecuentemente, esto reducirá sustancialmente la exposición a los órganos vecinos a la vejiga como el útero.
- Siempre que sea posible, deben evitarse radiofármacos tales como el pertecneiato o el galio citrato los cuales se concentran en la placenta, particularmente si luego tienen captación selectiva en los órganos fetales.

- El centellograma pulmonar brinda un buen ejemplo de evaluación riesgo beneficio, ya que es posible limitar la dosis realizando solamente el estudio por perfusión con una dosis menor de la habitual; el riesgo de cáncer durante la infancia no se incrementará significativamente en relación a la prevalencia normal y el riesgo de un embolismo pulmonar es por lejos mucho mayor.

- **La terapia con radionucleidos no está indicada durante el embarazo** y debe ser evitada. La dosis de radiación al embrión/feto resultará en un aumento del riesgo de cáncer durante la infancia y en algunas aplicaciones puede llevar a efectos **determinísticos** de la radiación. Se recomienda realizar un test de embarazo antes de administrar una dosis terapéutica y se le debe advertir a la paciente la necesidad de evitar un embarazo hasta que la dosis sea **menor de 1 mSv**. Para las pacientes con cáncer de tiroides esto se debe extender hasta que no haya evidencia de tejido tiroideo funcionante que pueda requerir una dosis ablativa de yodo. No se ha demostrado aumento de anomalías congénitas o cáncer de la infancia en casos de administración de radioyodo a pacientes con hipertiroidismo que se desconocía que cursaban un embarazo, sin embargo se ha reportado **hipotiroidismo congénito** luego de la administración prenatal de <sup>131</sup>I y la necesidad de una rápida intervención para prevenir el cretinismo. El <sup>131</sup>I atraviesa la placenta y la tiroides fetal comienza a concentrar el yodo aproximadamente durante la **semana 10** de gestación.

**c) Niños y lactantes.** Dado que el riesgo de cáncer inducido por la radiación es **mayor en los jóvenes** que en los adultos, se debe tener particular cuidado en mantener las dosis de radiación lo más bajas posibles cuando se trata de niños. Existen tablas de dosis recomendadas para niños en relación al peso así como factores S para el cálculo de la dosis absorbida. Se debe además tener en cuenta que se pueden minimizar aún más las dosis cuando se trata de adquirir imágenes estáticas, no siendo así con los estudios dinámicos o de SPECT. Dada la mayor radiosensibilidad de los niños el riesgo asociado a la radiación es también mayor que en un adulto, por esta razón hay que ser especialmente cuidadoso en que los pacientes estén **bien referidos para el procedimiento** y que la **utilidad clínica** del estudio y el **potencial beneficio** para el paciente sean evaluados contra el potencial riesgo de irradiación.

En caso de pacientes padres de niños pequeños, se les debe aconsejar **restringir el tiempo que mantengan a sus niños en brazos** por un período dependiente del radionucleido utilizado. Si existe la posibilidad de ingestión de radioactividad por **lactancia**, se debe estimar la dosis potencial de radiación al niño y la lactancia deberá ser interrumpida hasta que la radioactividad en la leche decaigan a niveles aceptables. El riesgo de irradiación del bebé debe ser evaluado contra los beneficios de la lactancia y el posible trauma para ambos, madre y niño.

**d) Investigación médica.** La ICRP no ha propuesto límite alguno con respecto a la irradiación de voluntarios en casos de **investigación**, sin embargo, el riesgo y el potencial beneficio de la exposición por propósitos de investigación debe estar sujeto a una revisión independiente (por ejemplo, un **comité de ética**). La aprobación estará normalmente condicionada a la existencia de protocolos escritos, restricción de la dosis de irradiación, información de los voluntarios y consentimiento informado de los mismos, exclusión de niños y embarazadas y mínimo número de sujetos. Existen guías propuestas por la ICRP de cómo conducir un proyecto de investigación utilizando radiación, que incluyen la evaluación de los riesgos y los beneficios para los pacientes y los voluntarios normales.

**e) Las emergencias médicas** tales como un paro cardíaco o una cirugía de urgencia en un paciente de medicina nuclear pueden requerir respuesta de staff médico no familiarizado con las precauciones requeridas. Se dispondrá de poco tiempo para la consulta o fuera de las horas de trabajo habrá poca posibilidad de hacerlo, pero en el caso de pacientes que se hayan realizado un **estudio diagnóstico** el riesgo es despreciable. Para pacientes que hayan recibido una **dosis terapéutica**, el riesgo para el staff de emergencia en un caso de resucitación cardiorrespiratoria es muy bajo y más que superado por el beneficio para el paciente.

El mensaje principal debe ser que **el riesgo de irradiación nunca es suficientemente alto para prevenir al staff, incluidas las embarazadas, de proceder a una respuesta frente a**

**una emergencia**, ya que aún cuando trabajen muy cerca del paciente durante media hora la dosis acumulada estará por debajo de la recomendada por la ICRP para el público. Debe estar disponible personal de guardia familiarizado con el procedimiento a fin de ayudar a prevenir contaminación y exposición innecesaria sin comprometer el cuidado del paciente.

La **planificación previa de posibles emergencias** es particularmente importante cuando se trata de pacientes con **terapia radioactiva**. Se pueden evitar problemas con la utilización de medidas tales como rotular al paciente con un banda en el puño para identificar rápidamente su status de riesgo radioactivo, la utilización de máscaras de resucitación y la disponibilidad de lugol u otros bloqueadores de tiroides cuando se manejen pacientes que hayan recibido radioyodo.

**f) Fallecimiento de pacientes sometidos a terapia con radionucleidos.** Aunque en principio no se le administra terapia con radionucleidos a pacientes terminales, han ocurrido muertes luego de una dosis terapéutica. El riesgo de muerte de pacientes tratados por cáncer de tiroides es muy pequeño, pero puede ser mayor para pacientes tratados con otros radionucleidos como los que reciben terapia paliativa por metástasis óseas o los ensayos clínicos que seleccionan casos terminales. En estas situaciones, puede requerirse la consulta con físicos médicos. Debe verificarse el nivel de actividad del cuerpo; existen guías que indican el umbral por encima del cual, dependiendo del radionucleido, deben tomarse precauciones especiales para el manejo del cuerpo, mientras que por debajo de dicho nivel basta con seguir las precauciones generales recomendadas en caso de autopsia.

## 9. LÍMITES DE DOSIS.

La ICRP ha recomendado **límites de dosis de exposición** a la radiación para los trabajadores ocupacionalmente expuestos y para el público en general.

a) **Los límites para los trabajadores ocupacionalmente expuestos** intentan prevenir la ocurrencia de efectos determinísticos, particularmente en la piel y el cristalino, y limitar la ocurrencia de efectos estocásticos tales como el cáncer y las enfermedades hereditarias a niveles de riesgo aceptable. Un concepto útil de la ICRP es la limitación de la dosis. El límite de dosis para la práctica de medicina nuclear y radiología es de **5 mSv/año**, pero se recomienda además una **dosis límite complementaria para las trabajadoras embarazadas** que intenta mantener la dosis al feto **por debajo de 1 mSv, similar a la del público**. Además se recomienda que las trabajadoras embarazadas no estén expuestas a un riesgo alto de exposición accidental. La ICRP enfatiza también que la implementación de un sistema apropiado de protección radiológica debería ser implementado para la protección del staff femenino **antes** de que sepan acerca de su embarazo.

b) **El límite de dosis para miembros del público en general** es de **1 mSv/año**; este límite se refiere a prácticas que aumentarán la exposición sobre los niveles naturales de fondo. Este límite de dosis para el público afecta la práctica de la medicina nuclear en muchos aspectos, por ejemplo, en el tiempo que debe permanecer internado en aislamiento un paciente al cual se le administró una dosis terapéutica o en cuánta distancia o blindaje se requiere entre una cama de terapia con radionucleidos y las áreas adyacentes, o el tiempo sugerido a una paciente que debe esperar antes de quedar embarazada luego de una dosis de terapia. La ICRP ha hecho una útil exclusión a esta clasificación de miembros del público con respecto a los amigos o familiares asistiendo en el tratamiento del paciente como médicos y por tanto no están sujetos a dosis límite. La responsabilidad de controlar la exposición de estos individuos claramente descansa en el médico tratante.

Quizás el mejor método para colocar la dosis de radiación en perspectiva es convertir la dosis en **riesgo absoluto**, el cual puede ser comparado con otros riesgos encontrados en la vida. Un método alternativo de expresar el riesgo absoluto es utilizar la **pérdida de expectativa de vida (LLE)**. Para un trabajador del área de medicina nuclear, la dosis efectiva anual es del orden

de  $2 \text{ mSv}$ . Si esta dosis es recibida todos los años durante la vida laboral (asumiendo de 18 a 65 años), la LLE es de 17 días. Este riesgo se compara favorablemente con muchas otras ocupaciones, y es interesante señalar que el mayor riesgo ocupacional es el de los **desempleados**.

Las estimaciones de la prevalencia local de cáncer, las enfermedades hereditarias y los problemas relacionados al embarazo pueden brindar información contra la cual se puede evaluar la incidencia radiogénica. ***El hecho de que la prevalencia natural sea generalmente mucho mayor que el riesgo de radiación de los procedimientos diagnósticos en la práctica clínica no retracta de la necesidad de adherir a la filosofía de ALARA.***

## **10. MONITORES PERSONALES Y SEÑALIZACIÓN.**

a) Los ***dosímetros personales*** son dispositivos utilizados por individuos expuestos a las radiaciones ionizantes para evaluar y documentar su nivel de exposición externa. Para el monitoreo personal de la radiación externa, en general se utiliza uno de los siguientes tipos de dosímetro: ***film fotográfico, termoluminiscente (TLD) o cámara de ionización de bolsillo***. Las leyes establecen que ***el personal expuesto a la radiación debe utilizar algún tipo de dosímetro para el monitoreo de la exposición personal***. Generalmente se utilizan el film o el TLD como detector de radiación para la dosimetría personal. El dosímetro debe ser usado ***en la parte del cuerpo que se estima recibirá la mayor dosis***. El período de tiempo que el dosímetro debe ser usado previo a su procesamiento debe ser no menor de 1 semana y no mayor de 1 mes para el personal que está rutinariamente expuesto a la radiación. Una tecnóloga embarazada debe usar además un dosímetro sobre el abdomen.

b) Las áreas en las cuales se utiliza o almacena material radioactivo deben estar ***señalizadas*** para indicar a los individuos que entran en un área de potencial peligro y para demostrar preocupación por la protección radiológica y control del área. El signo internacional de advertencia de radiación es el trébol de color magenta sobre fondo amarillo.

La señalización de áreas debe incluir la alerta de ***no permanencias para mujeres embarazadas o con posibilidad de estarlo***.

## Protección radiológica en Medicina Nuclear

### 1. INTRODUCCIÓN.

### 2. MEDIDA DE LA RADIACIÓN.

- a) Exposición a la radiación.
- b) Dosis absorbida (D).
- c) Efectividad biológica relativa (RBE).
- d) Dosis equivalente (H).
- e) Dosis equivalente efectiva (E).

### 3. FUENTES DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN.

- a) Tipos de emisión radioactiva.
- b) Tipos de exposición radioactiva.

### 4. GUÍAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.

- a) Prácticas
- b) Intervención

### 5. MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.

- a) Distancia.
- b) Tiempo.
- b) Blindaje.

### 6. COEFICIENTES DE ATENUACIÓN.

- a) Coeficiente de atenuación lineal ( $\mu$ ).
- b) Coeficiente de atenuación másico ( $\mu/\rho$ ).

### 7. CONTROL DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN DEL PERSONAL.

- a) Control de la exposición interna.
- b) Control de la exposición externa.

### 8. DERRAMAMIENTOS, ACCIDENTES Y SITUACIONES ESPECIALES.

- a) Derramamiento de material radioactivo.
- b) La paciente embarazada.
- c) Niños y lactantes.
- d) Investigación médica.
- e) Las emergencias médicas.
- f) Fallecimiento de pacientes sometidos a terapia con radionucleidos.

### 9. LÍMITES DE DOSIS.

- a) Trabajadores ocupacionalmente expuestos.
- b) Público en general.

### 10. MONITORES PERSONALES Y SEÑALIZACIÓN.