

INIS-UY--005



UY9700054

CURSO REGIONAL DE CAPACITACION

SOBRE LA PRACTICA DE LA

RADIOFARMACIA HOSPITALARIA

O.I.E.A. - UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

MONTEVIDEO - URUGUAY

13 DE JUNIO - 1 DE JULIO 1994



PROTECCION RADIOLOGICA

Dra. Ma. Cristina Ures Pantazi

**Cátedra Radioquímica
Facultad de Química**

Reproducción de Material Gráfico - Gentileza de Xerox Uruguay S.A.

PROTECCION RADIOLOGICA
Dra. Ma. Cristina Ures

INTRODUCCION

El hombre ha estado siempre expuesto a la radiación ionizante proveniente de fuentes naturales. Si bien la radiación natural varía de un lugar a otro, no se ha podido correlacionar con algún tipo de efecto sobre la salud. Por lo tanto, o no se producen efectos nocivos a esos niveles de exposición o su frecuencia es demasiado baja para ser determinada estadísticamente.

La peligrosidad potencial de la radiación ionizante se puso de manifiesto por primera vez en conexión con exposiciones debidas a fuentes producidas por el hombre. El descubrimiento de los rayos X y la identificación y separación de materiales radiactivos hacia el final del siglo pasado, causaron, además de grandes beneficios, sustanciales riesgos no previstos. En solo 5 años se registraron 170 casos de lesiones por radiación y hasta 1922, más de 300 radiólogos habían fallecido por efecto de sobreexposición.

A los seis meses del descubrimiento de los rayos X por Roentgen, en 1896, se informó sobre sus efectos nocivos: durante un cierto tiempo los trabajadores verificaban la potencia de salida de los tubos de rayos X exponiéndose a las radiaciones y midiendo el tiempo que transcurría hasta que se irritaba la piel. Más de 300 murieron posteriormente de enfermedades atribuidas a su exposición a las radiaciones (unos 250 de cáncer cutáneo y más de 50 de trastornos de la sangre, anemia, leucemia), no obstante se continuó con esas prácticas que hoy se saben que son peligrosas.

¿Qué es una la dosis de radiación?

Recibir una dosis de irradiación significa que uno se expuso a las radiaciones, es decir, que ha absorbido energía radiante. Ahora bien, como ocurre con las bebidas alcohólicas, el café o los medicamentos, sus posibles efectos solo se podrán evaluar si se sabe la cantidad de irradiación recibida y la tasa y forma en que se recibió. Por ej.: se puede tomar un vaso de whisky y no sentir ningún efecto, pero que pasa si tomo 10 vasos? para conocer el resultado, hay que saber entre otras cosas si los 10 vasos se bebieron en espacio de 20 minutos o 30 días.

La dosis de irradiación recibida por persona se expresa en Sieverts, ((antes, rem o milirem), dosis equivalente de radiación) y la tasa de irradiación se expresará entonces en milirem por hora, por año, etc. A título de ejemplo, una radiografía de tórax equivale a unos 20mrem aprox.

Por término medio recibimos anualmente de fuentes naturales 100mrem que fluctúa según el tenor de las circunstancias locales.

¿Cuándo comenzó la protección radiológica?

A medida que fue aumentando el uso de las radiaciones - por ejemplo, en aplicaciones médicas - se fue dejando sentir la evidente necesidad de reglamentar las dosis de irradiación. Los principios de la Radioprotección en Radiofarmacia, son los mismos que se aplican a la protección radiológica en todos los campos de trabajo.

Antes de continuar, debemos enfatizar que las radiaciones ionizantes necesitan ser tratadas *con cuidado* más bien que con *temor* y que sus riesgos se deben ver en perspectiva con otros riesgos. Los procedimientos accesibles para controlar la exposición a radiaciones ionizantes son suficientes, si se usan adecuadamente, para asegurar que permanece un mínimo componente del espectro de riesgos para los cuales todos estamos expuestos.

Existen varias organizaciones internacionales que se ocupan de la Protección Radiológica. Ellas están vinculadas a los distintos aspectos de la radioprotección, desde coleccionar datos científicos de niveles de radiación ambiental y radiobiología y el tratamiento de los mismos para evaluar los riesgos, hasta la formulación de normas de Protección Radiológica y recomendaciones de dosis permisibles para individuos de la población, así como códigos para la práctica de tipos particulares de trabajo. Las organizaciones que dan la base científica para el trabajo de Protección Radiológica son la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR, ICRP) y el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre el Efecto de la Radiación Atómica (UNSCEAR, Comité Científico de la NUERA).

ICRP

En 1928 se creó la Comisión Internacional de Protección contra las radiaciones (CIPR ó ICRP). La política adoptada por este organismo es tratar los principios básicos de la Protección Radiológica y dejar a los organizadores de protección nacionales la responsabilidad de introducir regulaciones técnicas detalladas, recomendaciones o códigos de práctica que mejor se adapten a las necesidades de cada país.

Por lo tanto no tiene un rol legislativo es un órgano independiente y no gubernamental, integrado por expertos, cuya finalidad consiste en formular recomendaciones sobre las dosis máximas de irradiación a las que las personas pueden exponerse sin riesgos y sus regulaciones han formado la base para normas concernientes a Protección Radiológica.

Las recomendaciones de la ICRP han gozado de aceptación universal en los últimos 50 años, habiéndolas admitido tanto

los órganos nacionales como los internacionales encargados de la protección radiológica.

UNSCEAR

Fue creado en 1956 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, para informar acerca de los efectos de las radiaciones ionizantes.

El UNSCEAR recoge por medio de su secretaría científica, datos de los niveles de radiación de todas partes del mundo e información científica de radiobiología, polución ambiental, procesos de concentración radioecológicos, dosis de trabajadores de todo los tipos de tareas con radiaciones, dosis de pacientes, etc. Todos esos datos se informan a la Asamblea General cada 2 ó 3 años.

ICRU

La Comisión Internacional de Medidas y Unidades Radiológicas (ICRU) está íntimamente relacionada a la ICRP. Su función es efectuar recomendaciones de como realizar mediciones de radiaciones y dosis de radiación.

Brinda recomendaciones en términos de límites de radiación para varios órganos y tejidos del cuerpo.

¿Contra qué se nos protege?

En casos extremos, de la irradiación externa de todo el organismo (ó irradiación global) a niveles de actividad muy elevados, durante un período muy corto de tiempo, por ej.: una sola dosis que sea 3000 a 4000 veces superior a la dosis anual de la radiación de fondo, tiene consecuencias fatales. Con dosis inferiores, la exposición puede ocasionar quizá cáncer y leucemia, probabilidad que disminuye con la dosis. Esta propiedad de inducir cáncer (carcinogenia), las radiaciones la comparten con un buen nº de sustancias químicas, naturales y artificiales; por ej.: el amianto, monómeros de vinilo, muchos plaguicidas y algunos componentes del humo del tabaco). La exposición a las radiaciones y también a ciertas sustancias químicas, puede generar también defectos genéticos que aparecen en generaciones futuras.

Los dos objetivos de la protección radiológica tal como los entiende la ICRP, son:

1. Impedir los efectos agudos de las radiaciones;
2. Limitar los riesgos de cáncer y de defectos genéticos.

Para conseguir estos objetivos, la ICRP ha formulado recomendaciones que se inspiran en tres principios generales que se discutirán más adelante:

1. No debe adoptarse ningún procedimiento, a menos que de él se derive un beneficio neto positivo.
2. Toda exposición a las radiaciones debe mantenerse al nivel más bajo que razonablemente se puede conseguir, después de tener en cuenta los factores económicos y sociales, (ALARA).
3. Los que por el ejercicio de su profesión se hallan expuestos a las radiaciones (ej.: técnicos en rayos X) no deben recibir una dosis superior a 500 mSv al año. Para las personas de la población, la dosis no debe sobrepasar los 50 mSv al año, ni un promedio de 20 mSv al año durante toda su vida. Es decir la dosis equivalente de los individuos no debe exceder los límites recomendados por la comisión de acuerdo a la circunstancias.-

Los límites de la ICRP son valores máximos que no se pueden sobrepasar; es común que en los distintos países al aceptar estas recomendaciones, se fijen límites aún más rigurosos que los recomendados.

Basándose en las recomendaciones de la ICRP y en consulta con la OMS, con la OIT, FAO y con otros órganos, el OIEA elabora normas básicas de seguridad en materia de protección radiológica que se utilizan como referencia para las legislaciones nacionales.

Aunque no son completamente conocidos los efectos de la radiación, sí, se conoce un cierto número de factores que influyen en el efecto nocivo de las mismas estos incluyen: TIPO Y ENERGIA DE LA RADIACION, PODER DE PENETRACION, IONIZACION ESPECIFICA, PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION, PERIODO BIOLÓGICO Y PERIODO EFECTIVO, ENTRE LOS PRINCIPALES.

Los diagnósticos y tratamientos clínicos son la principal fuente de exposición del público a las radiaciones artificiales, pero es enorme el beneficio que se obtiene de ellas en términos de vidas humanas y de ventajas para la salud.

RIESGO

Es la probabilidad de tener un efecto nocivo para un individuo a partir de una determinada dosis de radiación.-

DETRIMENTO

Implica riesgo y severidad del daño. El detrimento G para un grupo de N personas es:

$$G = N \sum_i p_i g_i$$

donde p_i es el riesgo de cada efecto y g_i cuantifica la severidad del efecto nocivo implicado.

En el caso de Radiofarmacia, la responsabilidad relativa a Protección Radiológica puede considerarse dividida en tres categorías principales: pacientes, empleados y público. La exposición mucho mayor del paciente, comparada por ej. con público, se justifica en base a beneficio neto.

Al Radiofarmacéutico inevitablemente le concernirá la Protección Radiológica, al menos en su propio laboratorio.

El ejercicio de la Protección Radiológica obliga a controlar la seguridad desde el diseño de procesos, equipos y fuentes, de modo de minimizar la exposición y de estar siempre dentro de los límites aceptables.

Dado que se reconoce que siempre puede haber daño al exponer tejidos biológicos a la radiación, toda exposición innecesaria o no productiva deberá ser eliminada.-

ASPECTOS BIOLÓGICOS Y CLASIFICACION DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES

El proceso de ionización necesariamente cambia átomos y moléculas por lo menos transitoriamente y esto puede dañar las células. Si esto ocurre y no son adecuadamente reparadas puede suceder que la célula no sobreviva o no se reproduzca o puede resultar en una célula viable pero modificada. Las dos opciones tienen implicaciones profundamente distintas para el organismo como un todo. La mayoría de los órganos y tejidos del cuerpo no son afectados por la pérdida de un número sustancial de células, pero si el número perdido es demasiado grande, habrá un daño observable reflejado en la pérdida de función del tejido. Tal riesgo será cero a pequeñas dosis, pero por encima de determinada dosis (el umbral), crecerá a la unidad (100%). Por encima del umbral el daño también crecerá con la dosis, este tipo de efecto, antiguamente llamado "no estocástico", ahora se llama *determinístico*. Umbrales para estos efectos son a menudo dosis de unos pocos gray o tasa de dosis de una fracción de 1gy/año.

El resultado es muy diferente si la célula irradiada se modifica en vez de morir. A pesar de la existencia de mecanismos de defensa altamente efectivos, el clon de células resistentes de la reproducción de células somáticas viables pero modificadas, después de un período prolongado y variable, llamado "período de latencia", puede resultar en la manifestación de una condición maligna, cáncer.

La probabilidad de un cáncer como resultado de la radiación aumenta con la dosis, probablemente no necesita umbral. La severidad del cáncer no es afectada por la dosis. Esta clase de efectos se llaman *estocásticos* y esto significa "al azar", de naturaleza estadística.

Tanto efectos somáticos como enfermedades malignas, así como efectos hereditarios, son considerados estocásticos para el rango de dosis manejado en Protección Radiológica. Aunque para dosis bajas no se conoce con certeza la forma de la curva dosis-efecto, los principios de la Protección Radiológica se basan en la suposición de que hay proporcionalidad directa entre la D y la probabilidad de efectos estocásticos, sin umbral.

Es característico de los efectos estocásticos su aparición retardada, a largo plazo, no conociéndose método alguno para reducir la probabilidad de estos efectos una vez recibida la dosis.

En general en la industria nuclear y más aún en Radiofarmacia y Medicina Nuclear, es muy improbable que encontremos efectos inmediatos o a corto plazo, dado que sólo un serio accidente que condujera a grandes exposiciones podría derivar en efectos inmediatos, como se deduce de un examen de los datos del cuadro NQ1.-

La principal preocupación, entonces, en lo que se refiere a trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes, debe ser la incidencia de cáncer como efecto a largo plazo. Veremos algunas cifras al respecto, en el cuadro NQ2.

Como se verá en temas posteriores entre las tareas del radiofarmacéutico figuran la prevención de exposiciones innecesarias a la radiación en los laboratorios de su dirección, siendo de su responsabilidad el manejo seguro del material radiactivo en los mismos. Como además, el personal que utilice material radiactivo debe conocer las distintas unidades de magnitudes relativas a medición de la radiación y reconocer la necesidad de ciertas limitaciones a la exposición, haremos una revisión de las mismas en el cuadro NQ3.

Cuadro N°1

EFFECTOS E IMPORTANCIA DE DIFERENTES DOSIS DE RADIACION EN EL HOMBRE

Dosis por exposición única a radiación electromagnética		Efecto esperado o Importancia biológica
GRAY	RAD	
A) EXPOSICION LOCAL		
30	3000	Dosis para radioterapia de tumores. Necrosis de piel. Aparicion de eritemas en piel. Depilación.
5-10	500-1000	
3-6	300-600	
B) EXPOSICION DE CUERPO ENTERO		
4	400	50% mortalidad (radiación γ) Cambios en cuadro sanguíneo. Posibles daños agudos Cambios en cuadro sanguíneo. Normalmente, ausencia de daños severos.
0.75-1.50	75-150	
0.25-0.75	25-75	

Tomado de "Medical Supervision of Radiation Workers", OIEA, 1968.

DOSIS ABSORBIDA, D.-

La cantidad dosimétrica fundamental en Protección Radiológica es la *Dosis Absorbida*. Esto es la *Energía absorbida por unidad de masa*.

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

$d\bar{E}$ es la Energía impartida por la radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen y dm es la masa de materia en este elemento de volumen. La unidad SI para la dosis

absorbida es el Joule/kg y su nombre especial es el Gray, (Gy) antes Rad.

La *Dosis Absorbida*, está definida en términos que permiten especificarla en un punto; pero la veremos como dosis promedio sobre un tejido u órgano. El uso de esta dosis promedio es un indicador de la probabilidad de efectos estocásticos subsecuentes, depende de la linealidad de la relación entre la probabilidad de producir un efecto y la dosis, (relación dosis-respuesta), es una aproximación razonable sobre un rango limitado de dosis. La relación dosis respuesta no es lineal para los efectos determinísticos, así que la dosis promedio absorbida no es directamente relevante para los efectos determinísticos a menos que esté uniformemente distribuida en el órgano o tejido.

La derivada con respecto al tiempo de la dosis absorbida es la *Tasa de Dosis Absorbida*, D, Gy/h.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Cuadro NQ2.

FUENTE	Estimación del NQ de casos adicionales de cancer de pulmón producidos para un millón de personas después de exposiciones individuales de 0,01Sv (1rem).
BEIR 1979	268 - 399
ICRP 1977	300
UNSCEAR 1977	300

ICRP y UNSCEAR estiman 100 muertes tardías adicionales a esos 300 casos de cáncer inducidos por radiaciones. Solamente alrededor de 1/3 de los casos de cáncer son fatales. Cabe destacar que los tres grupos, independientemente, concuerdan acerca del riesgo de cáncer inducido por radiaciones.

DOSIS EN UN ORGANNO.

A los efectos de la Protección Radiológica, es útil definir la dosis absorbida promedio en un órgano o tejido, T, D_T .

$$D_T = \frac{\dot{E}_T}{m_T}$$

E_T es la energía total impartida a un órgano o tejido y m_T es la masa de ese órgano o tejido.

Por ejemplo: m_T puede variar desde menos de 10g para ovarios hasta más de 70k para cuerpo entero.

FACTOR DE PONDERACION DE LA RADIACION, w_R .

Se encontró que la probabilidad de la existencia de los *efectos estocásticos* depende no solo de la dosis absorbida, sino también del tipo y energía de la radiación que causa esa dosis. Esto es tenido en cuenta al afectar la dosis absorbida por un factor relacionado con la calidad de la radiación.

En el pasado, este factor se aplicaba a la dosis absorbida en un punto y se llamaba factor de calidad Q. La dosis absorbida ponderada se llamó *Dosis equivalente*, H.

DOSIS EQUIVALENTE EN UN ORGANNO O TEJIDO, H_T .

Es la dosis promedio absorbida en un órgano o tejido, T y afectada por la calidad de la radiación, R. El factor de ponderación, w_R , se selecciona para el tipo y energía de la radiación incidente en el cuerpo ó en el caso de fuentes dentro del mismo cuerpo, emitidas por esa fuente. Esta dosis absorbida es estrictamente una dosis y su símbolo es H_T .

La dosis equivalente en un tejido, T está dada por la expresión:

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

Donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida promediada sobre el órgano o tejido, debido a la radiación R. Como w_R , no tiene unidades, la unidad de dosis equivalente es el joule/k y se conoce con el nombre de Sievert, (Sv).

Cuadro N°3.

REVISION DE DEFINICIONES, CONCEPTOS Y UNIDADES

NOMBRE	SIMBOLO	UNIDADES	OBSERVACIONES
Dosis absorbida	D	Gy(Gray), Rad	$D = d\bar{E}/dm$ 1Gy = 100Rad cualquier radiacion cualquier material
Tasa de dosis	\dot{D}	Gy/h	$\dot{D} = dD/dt$
Dosis equivalente organo o tejido	$H_{T,R}$	Sv (Sievert) rem	$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$ w_R , factor de ponderación de la radiación. 1Sv=100rem
Dosis efectiva	E	Sv, rem	$E = \sum_T w_T H_T$ w_T , factor de ponderación del tejido
Riesgo	p		Posibilidad de daño por exposición a la radiación
Detrimento	G		Implica riesgo y severidad del efecto nocivo
Dosis equivalente de compromiso	$H_T(\tau)$	Sv, rem	$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{\tau} \dot{H}_T(t) dt$
Dosis efectiva de compromiso	$E(\tau)$	Sv, rem	$E(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(\tau)$
Dosis equivalente colectiva	S_T	Sv.hombre	$S_T = \int_0^{\infty} H_T dN/dH_T \cdot dH_T$
Dosis colectiva efectiva	S	Sv.hombre	$S = \sum_i \bar{E}_i \cdot N_i$

La derivada con respecto al tiempo de la dosis equivalente, $H_{T,R}$, es la *Tasa de dosis equivalente*.

El valor del factor de ponderación de la radiación para una energía y un tipo específico de radiación ha sido seleccionado por la ICRU de manera de ser representativo de los valores del *efecto biológico relativo, (EBR)*, de esa radiación en inducir efectos estocásticos a bajas dosis.-

Los valores de w_R son ampliamente compatibles con los valores de Q , los cuales están relacionados a la *Transferencia Lineal de Energía, (LET)*, esto es, una medida de la densidad de ionización a lo largo del trayecto de una partícula ionizante.-

La ICRU ha elegido un valor de ponderación de la radiación de la unidad, para radiaciones de bajo LET, incluyendo radiaciones X y γ de todas las energías.

Tabla N01.-

FACTORES DE PONDERACION DE LA RADIACION, w_R^1

TIPO Y RANGO DE ENERGIA	FACTOR DE PONDERACION, w_R
Fotones, todas E	1
Electrones y muones todas E	1
Neutrones, E <10 Kev	5
10 Kev a 100 Kev	10
>100 a 2 Mev	20
>2 Mev a 20 Mev	10
> 20 Mev	5
Protones, E > 2 Mev	5
alfas, frag. de fisión, núcleos pesados	20

¹ El efecto biológico relativo EBR, es la relación entre la dosis necesaria para producir un cierto efecto biológico, irradiando con Rayos X de 250 Kev y la dosis necesaria para producir el mismo efecto biológico irradiando con la radiación que se considera. $H = D * EBR$.-

La elección para otras radiaciones está basada en valores de EBR observados, independientemente de que la radiación sea X o γ .- Valores de w_R se ven en la tabla NQ1.-

Cuando el campo de radiación está compuesto por varias y distintos tipos de energías, con distintos valores de w_R , la dosis absorbida debe subdividirse en bloques y multiplicarse por su propio valor de w_R y sumarse para determinar la *Dosis Equivalente Total*,

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

$D_{T,R}$, es el promedio de la dosis absorbida de la radiación R en el tejido T.-

FACTOR DE PONDERACION DE TEJIDO, w_T Y DOSIS EFECTIVA, E.

La relación entre la probabilidad de los efectos estocásticos y la dosis equivalente se encuentra que también varía con el *órgano o tejido* irradiado. Por lo tanto, es apropiado definir una cantidad derivada de la dosis equivalente para indicar la combinación de las distintas dosis a distintos tejidos de manera de correlacionar bien con los efectos estocásticos totales.

El factor con el cual se pondera la dosis equivalente en el órgano o tejido T es w_T , (probabilidad de daño en el tejido T, cuando todo el cuerpo es irradiado uniformemente). Los valores de w_T se eligen de manera que *una dosis equivalente uniforme sobre todo el cuerpo, da una dosis efectiva numericamente igual a la dosis equivalente uniforme*. La suma de los w_T , es entonces igual a 1. Esta dosis equivalente ponderada, (dosis absorbida doblemente ponderada), antes se llamaba dosis equivalente efectiva, hoy se llama *Dosis Efectiva, E* y la unidad es nuevamente el joule/k, el Sievert.

La dosis efectiva E, es la suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los órganos y tejidos:

$$E = \sum_T w_T * H_T$$

H_T , es la dosis equivalente en un órgano o tejido y w_T , los factores de ponderación para el tejido T:

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

Donde $D_{T,R}$ es la dosis media absorbida en el tejido u órgano T entregada por la radiación R. En ambas expresiones, la radiación es, o incidente o emitida por una fuente dentro del cuerpo.

Los valores recomendados para w_T se ven en la Tabla 2.-

DOSIS EQUIVALENTE DE COMPROMISO, $H_T(\tau)$.

La exposición a un campo de radiación de una radiación penetrante aplicada externamente, resulta en la deposición simultánea de energía en el tejido.

La irradiación del tejido por un radionucleido incorporado, varía con el tiempo y continua mientras el radionucleido decae.

La distribución en el tiempo de la energía depositada varía con la forma fisicoquímica del radionucleido y su subsiguiente comportamiento biocinético.

Para tener en cuenta esta distribución en el tiempo, la ICRU recomienda el uso de la *Dosis Equivalente de Compromiso*, que es la integral en el tiempo τ , de la tasa de dosis equivalente en un tejido particular, que recibirá un individuo, luego de la ingesta o incorporación de material radiactivo.

Tabla N02.-

FACTORES DE PONDERACION, SEGUN EL TEJIDO, w_T

TEJIDO U ORGANO	FACTOR DE PONDERACION, w_T
Gonadas	0.20
Médula ósea	0.12
Pulmón	0.12
Vejiga	0.05
Mama	0.05
Hígado	0.05
Tiroides	0.05
Hueso	0.01
El resto	0.05

Cuando el período de integración τ no se da, se toma un período de 50 años para adultos o 70 años para niños

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{\tau} \dot{H}_T(t) dt \quad \tau \text{ en años}$$

para una sola incorporación de actividad en el tiempo t_0 donde $\dot{H}_T(\tau)$ es la tasa de dosis equivalente relevante en un órgano T en el tiempo t y τ es el período de tiempo sobre el cual se ejecuta la integral.

DOSIS EFECTIVA DE COMPROMISO, $E(\tau)$.

Si la dosis equivalente de compromiso para un órgano o tejido resultado de la incorporación se multiplica por los factores de ponderación apropiados y se suman, resultara la *Dosis Efectiva de Compromiso*.

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

DOSIS EQUIVALENTE COLECTIVA, S_T .

Se definió una cantidad para expresar la exposición total a la radiación por un órgano o tejido específico en un grupo de individuos. La expresión es:

$$S_T = \int_0^{\infty} H_T dN/dH_T dH_T$$

donde $(dN/dH_T)dH_T$ es el número de individuos que reciben la dosis equivalente entre H_T y H_T+dH_T o por

$$S_T = \sum_i \bar{H}_{T,i} N_i$$

donde N_i es el N° de individuos en una población o subgrupo i, que recibe una dosis equivalente media en un órgano. La dosis equivalente colectiva se puede subdividir en compartimientos en los cuales las dosis individuales caen dentro de rangos especificados.

DOSIS COLECTIVA EFECTIVA, S.

Si se desea una medida de la exposición a la radiación en una población, se puede calcular la *Dosis Colectiva Efectiva*.

$$S = \int_0^{\infty} E \cdot dN/dE dE \quad \text{ó} \quad \sum_i \bar{E}_i N_i$$

donde E_i es la dosis media efectiva para el grupo i .
Ni S o S_T especifican en forma explícita durante cuanto tiempo esa dosis es recibida, por lo tanto el período de tiempo y la población sobre la cual la dosis equivalente colectiva debe integrarse o sumarse se debe especificar.

DOSIS LIMITES Y NIVELES DE REFERENCIA

Las limitaciones de dosis se necesitan como parte del control de la exposición ocupacional, tanto para imponer un límite en la elección de la dosis permitida, como para proveer una protección contra errores de juicio en la aplicación de la optimización.

Las dosis límites para aplicar en exposición ocupacional y para público en general, se ven en el cuadro NQ4.

Para exposición ocupacional, la ICRU en 1990 recomienda, limitar la dosis efectiva a 0,1Sv en un período de 5 años, valor anual promedio de 0.02Sv, (2rem), con un límite de 0.05 Sv por año.

El límite para el cristalino del ojo, es importante desde el punto de vista de la irradiación externa del cuerpo.

En caso de exposición interna, el límite de ingesta anual, (ALI) está basado en una dosis efectiva de compromiso de 0.02 Sv.

El ALI para cualquier radionucleido se obtiene dividiendo la dosis límite efectiva anual promedio (0.02 Sv), por la dosis efectiva de compromiso, $E(50)$, resultante de la ingesta de un Bq de ese radionucleido.

Para mujeres en edad de procrear, toda exposición innecesaria deberá distribuirse en el tiempo tan uniformemente como sea posible. Esto es para protección del embrión en el caso de embarazos aún no detectados.

Una vez que el estado de gravidez se ha manifestado, se debe proteger suplementando con una dosis equivalente límite en la superficie del abdomen (tronco inferior) de 2mSv para el resto del embarazo y limitar la incorporación de radionucleidos a 1/20 del ALI.

Para miembros del público, el OIEA ha fijado los límites de dosis equivalente anual en 1/20 de los límites indicados para personal ocupacionalmente expuesto. Estos límites de dosis se han fijado para su aplicación en grupos críticos de la población.

Cuadro N°4.-

DOSIS LIMITES RECOMENDADAS

DOSIS LIMITE		
APLICACION	OCUPACIONAL	PUBLICA ³
DOSIS EFECTIVA	20mSv/año promediada en periodos definidos de 5 años ⁴	1mSv/año
DOSIS EQUIVALENTE ANUAL en		
Cristalino del ojo	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	-----

Sin embargo en el caso de que los mismos miembros individuales del público pudieran estar expuestos a exposiciones cercanas al límite anual por periodos prolongados, se deberá restringir la Dosis efectiva para tiempo de vida a un promedio de 1mSv/año, (dado que el riesgo de muerte por cáncer natural en muchos países es del orden de 10^{-5} /año, y que se tiene el valor de 1×10^{-4} casos de muerte por cáncer/rem hombre al mantenerse en el orden de 0.1rem/año se están fijando los límites que conducen a que por exposición a las radiaciones no haya aumentado la incidencia de cáncer.

³ 1/20 de la dosis del ocupacionalmente expuesto

⁴ La dosis efectiva no debe exceder 50mSv en todo el año

LIMITES SECUNDARIOS

Se usan cuando no pueden aplicarse directamente los primarios, (Dosis equivalente, Dosis efectiva, efectiva de compromiso).

En el caso de *exposición externa*, los límites secundarios se expresan en términos de *INDICES DE DOSIS*, $H_{I,D}$ ó $H_{I,S}$.

En el caso de *exposición interna*, en términos de *LIMITES ANUALES DE INGESTA o INCORPORACION*, que se tabulan para cada radionucleido.

Resumiendo lo dicho, los límites anuales no se excederán, si se cumplen las siguientes condiciones:

INDICE DE DOSIS EQUIVALENTE ANUAL EN SUPERFICIE, $H_{I,S}$

$$\frac{H_{I,S}}{500(\text{mSv})} \leq 1 \text{ o bien } \frac{H_{I,S}}{50(\text{rem})} \leq 1$$

para efectos determinísticos;

INDICE DE DOSIS EQUIVALENTE ANUAL PROFUNDA, $H_{I,D}$

$$\frac{H_{I,D}}{50\text{mSv}} + \sum_j \frac{I_j}{ALI_j} \leq 1 \quad \text{o bien}$$

$$\frac{H_{I,D}}{5(\text{rem})} + \sum_j \frac{I_j}{ALI_j} \leq 1,$$

para efectos estocásticos.

Donde I_j es la incorporación anual del radionucleido j).

Los valores de ALI y DAC (Concentración Derivada de Aire) se encuentran tabulados según el periodo de semieliminación biológica del material. Los valores se dan en Bq para los ALI y en Bq/m³ para los DAC, basándose dichos valores en semanas de 40hs.

Al recomendar los límites de dosis, el objetivo de la Comisión es establecer para un cierto número de prácticas y para exposición regular y continuada un nivel de dosis sobre el cual las consecuencias para los individuos sean ampliamente vistas como aceptables. En el pasado la comisión usaba la probabilidad atribuible de muerte o de severos desórdenes hereditarios como bases para juzgar las consecuencias de una exposición.

Los límites de dosis forman parte del sistema de protección pensado para alcanzar niveles de dosis que sean tan bajos como razonablemente sea posible, también se tiene en cuenta factores económicos y sociales. No son el objetivo; representan el punto de vista de la Comisión, en el cual la exposición ocupacional, regular, extendida, deliberada, puede razonablemente ser vista como justamente tolerable.

Las restricciones sobre la dosis efectiva, son suficientes para asegurar que se evitan los efectos determinísticos en todos los tejidos y órganos excepto en el cristalino del ojo, (el cual tiene una contribución apreciable a la dosis efectiva), y la piel, la cual puede ser sujeto de exposiciones localizadas. Por lo que hay dosis límites para estos tejidos, como ya vimos.-

SISTEMA DE LIMITACION DE DOSIS.

El sistema de protección radiológica recomendado por la ICRP, está basado, como ya mencionamos, en los siguientes principios generales, que son relevantes para la protección radiológica de los pacientes en medicina.

a) Justificación de la práctica.

No se debe adoptar ninguna práctica de exposición a las radiaciones a menos que produzca al individuo expuesto o a la sociedad, un beneficio neto positivo, con respecto al detrimento causado por la radiación.

b) Optimización de la protección.

En relación a cualquier fuente, en una "práctica", la magnitud de las dosis individuales, el número de personas expuestas y la probabilidad de que otras resultaren expuestas, debe mantenerse tan bajo como sea razonablemente alcanzable, tomando en cuenta factores económicos y sociales. El requerimiento básico para optimización puede seguir un enfoque cualitativo en la práctica operacional, y uno más cuantitativo en la elección de los criterios de diseño. (Este último tratamiento del problema se recomienda como guía para las autoridades, cuando deben formular requerimientos cuantitativos). El objetivo del análisis cuantitativo es el de asesorar hasta que límite deberán reducirse las exposiciones sin que una reducción adicional no justifique ya el incremento de costo involucrado. Debemos insistir en que el método cuantitativo aplicado en optimización es para uso en diseño de vastos programas de Radioprotección y que la optimización se vuelve más cualitativa a medida que el concepto se aplica a operaciones llevadas a cabo en centros ya existentes.

c) Límites de dosis individuales y del riesgo.

La exposición de los individuos, resultante de la combinación de todas las prácticas relevantes, debe estar sujeta a límites de dosis, o a algún control sobre los riesgos en el caso de una potencial exposición.

Esto es para asegurar que ningún individuo sea expuesto a riesgos por radiación que se consideren inaceptables para esa práctica en circunstancias normales

A la luz de los conocimientos actuales, para radiaciones de bajo LET (como es en general en Radiofarmacia) el riesgo a la salud debido a efectos estocásticos se considera proporcional a la dosis equivalente, a bajas dosis y bajas tasas de dosis. El factor de proporcionalidad se llama factor de riesgo.

Los factores de riesgo, obtenidos a partir de datos estadísticamente válidos provenientes de exposiciones a radiaciones ionizantes, son considerados por la ICRP para la fijación de límites de dosis.

ESTIMACION DE DIAS DE VIDA PERDIDOS POR ACCIDENTES LABORALES

TIPO DE INDUSTRIA	ESTIMACION DE LA ESPECTATIVA DE DISMINUCION DE DIAS DE VIDA POR ACCIDENTES LABORALES
Industria en general	74
Comercio	30
Manufactura	43
Gobierno	55
Transportes y Servicios Afines	164
Agricultura	277
Construcción	302
Minería y Canteras	328
Accidentes por radiaciones, muerte por exposición	Menor que 1
Dosis de radiación de 5mSv/año, 50 años	25
Dosis de radiación de 50mSv/año, 50 años	250
Accidentes industriales en Instalaciones Nucleares (no causados por irradiación)	58

Adaptado de Cohen y Lee "A Catalogue of Risk and Health Implications of Power Production", WHO. (1980).-

Para exposición ocupacional, la ICRP ha buscado que el riesgo a la salud no supere en ningún caso el de industrias de alto nivel de seguridad. Estas industrias presentan una mortalidad anual no superior a 10^{-4} (1 en 10000).

Cuadro N°6

COMPARACION DE RIESGOS VOLUNTARIOS E INVOLUNTARIOS

VOLUNTARIOS		INVOLUNTARIOS	
ACTIVIDAD	RIESGO DE MUERTE por persona por año (10^{-5})	ACTIVIDAD	RIESGO DE MUERTE por persona por año (10^{-7})
Fumar 20/día cigarrillos	500	Atropellamiento/vehículos	500
Beber 1L vino/día	75	Inundaciones	22
Futbol	4	Terremotos	17
Carreras auto	120	Tornados, USA	22
Alpinismo	4	Tormentas, USA	8
Conducir autos	17	Relámpagos (UK)	1
Motociclismo	200	Accidentes aéreos	1
Anticonceptivos orales	2	Explosión de recipientes a presión	0.5
Sacarina	0.2	Descargas de plantas de E. Nuclear, en el lugar, USA a 1 Km, (UK)	1 1
Radiodiagnóstico	1	picadura por animales venenosos	1
Compartir ambiente con un fumador	1	Transporte de petróleo y productos químicos, USA	0.5

cont. Cuadro NQ6

COMPARACION DE RIESGOS VOLUNTARIOS E INVOLUNTARIOS

VOLUNTARIOS		INVOLUNTARIOS	
ACTIVIDAD	RIESGO DE MUERTE por persona por año (10^{-5})	ACTIVIDAD	RIESGO DE MUERTE por persona por año (10^{-7})
		Leucemia	800
		Gripe	2000
		Meteoritos	0.0006
		Radiación cósmica, por explosión de supernovas	0.1-0.0001

Tomado del Boletín de OIEA, Vol 22 NQ5/6

Para miembros del público, la ICRP (Publicación NQ 26), tomando en cuenta información sobre riesgos regularmente aceptados en la vida cotidiana, indica que el nivel de aceptabilidad de riesgos fatales debe ser de un orden de magnitud menor que para riesgos ocupacionales (entre 10^{-6} y 10^{-3} por año).

EXPOSICION OCUPACIONAL

1) CLASIFICACION DE CONDICIONES DE TRABAJO

CONDICION DE TRABAJO A: Cuando la exposición anual puede superar los 3/10 de los límites de Dosis Equivalente (Trabajadores bajo supervisión médica especial y control individual de H, lo que implica uso de monitores personales y controles de contaminación interna).

CONDICION DE TRABAJO B: Cuando es extremadamente improbable que se excedan los 3/10 de los límites de H (En general es suficiente con el monitoreo de áreas, pudiéndose llevar a cabo en algunos casos, para confirmar condiciones satisfactorias de trabajo, monitoreo individual. A estas condiciones de trabajo deberán estar sujetos tanto estudiantes menores de 18 años como mujeres embarazadas).

2) CLASIFICACION DE AREAS DE TRABAJO

AREAS CONTROLADAS: De acceso controlado de trabajadores, correspondientes a lugares donde se puedan sufrir exposiciones mayores a los 3/10 de los límites de H.

Deberán estar adecuadamente señalizados, indicándose todo lo concerniente a magnitud y naturaleza particular del riesgo implicado.

AREAS SUPERVISADAS: Aquellas en cuyo límite resulta muy improbable que la dosis equivalente anual, exteriormente al área supervisada, supere el décimo de los límites ocupacionales. (Es conveniente establecer controles periódicos de dichas áreas).

3) SUPERVISION MEDICA

Se basará en principios generales de medicina ocupacional, siendo de gran importancia su información, como, base, en caso de exposición accidental o enfermedad ocupacional.

4) REGISTROS

Deben llevarse registros de los resultados del control (por monitores) de los trabajadores, así como de los datos provenientes de la supervisión médica.

EXPOSICION MEDICA

Deberá estar sujeta a justificación y optimización. Es decir que el uso de la radiación ionizante para propósitos médicos debe evitarse a menos que se justifique y la Protección Radiológica deberá optimizarse de modo que la Dosis al paciente sea tan baja como sea razonablemente alcanzable y consistente con los resultados deseados. (Es importante que la evaluación de los detrimentos implicados sea realista, para no desechar -por sobreestimación de riesgos- tratamientos o exámenes justificados).

A causa del riesgo de daño por irradiación al feto, deben estudiarse los detalles de la Técnica Radiológica que aseguren minimización de exposición al embrión se sepa o no que la mujer está embarazada. En Radiofarmacia y Medicina Nuclear actualmente se recomienda hacer los estudios de diagnóstico (caso del ^{99m}Tc) para mujeres en edad de procrear, durante los 10 días que siguen al comienzo de la menstruación.

En casos individuales, *exámenes radiológicos periódicos*, deben cumplir con evaluación de la *justificación* respecto a la información útil obtenida y la importancia de la misma para la salud del individuo. (En el caso de exámenes sistemáticos para grupos de población, la justificación se basará en un balance costo-beneficio que redundará en el costo del detrimento por irradiación). En el caso de voluntarios, se les debe explicar los riesgos estimados.

RESTRICCION DE LAS EXPOSICIONES OCUPACIONALES

Estas *restricciones* deben referirse fundamentalmente a las *fuentes de radiación y a las características del lugar de trabajo*. En otras palabras, el énfasis debe hacerse sobre la seguridad intrínseca del lugar de trabajo y sólo secundariamente sobre la protección que depende de las acciones propias del trabajador.

(El uso de equipo de protección personal debe ser, en general, suplementario a previsiones más importantes).

La exposición externa puede reducirse por optimización del **BLINDAJE, DISTANCIA Y TIEMPO DE EXPOSICION**. El blindaje, adecuado de las fuentes de radiación produce intrínsecamente condiciones seguras en el lugar de trabajo.

La contaminación por materiales radiactivos puede restringirse por contención y limpieza general. La contención (que provee seguridad intrínseca) consiste en el uso de "barreras", dependiendo su naturaleza y número de los riesgos implicados.

EXPOSICION ACCIDENTAL Y DE EMERGENCIA

En caso de que uno o más trabajadores hayan sufrido exposición o contaminación de entidad, corresponde:

- Estimar las dosis y/o absorción de radionucleidos.
- Colectar excretas para ensayos biológicos.
- Efectuar control médico.

Recoger información completa sobre las circunstancias en que se produjo la exposición.

En cualquier caso en que se exceda el doble del límite anual, deberá someterse al trabajador a revisión médica especial, con consideraciones generales sobre posibles restricciones en lo que respecta al futuro laboral de la persona sobreexpuesta.

En lo que respecta a los laboratorios de Radiofarmacia, es aconsejable tener planes de acción para posibles accidentes (incendios, contaminaciones serias por ruptura de recipientes o accidentes en los diferentes métodos de esterilización, etc.)

Es esencial que se establezcan reglas detalladas para el manejo de fuentes radiactivas abiertas; estas reglas deben acompañarse de la instrucción y el entrenamiento cuidadoso del personal en sus distintos niveles. Este ítem es de particular importancia y la experiencia muestra que la disciplina requerida en preparar tales reglas puede por sí misma, resultar en el mejoramiento de las prácticas de manufactura del radiofármaco en cuestión.-

Los años pasados han sido de una continua expansión en el ya extenso uso del ^{99m}Tc y un crecimiento significativo del uso del ^{111}In , en particular como marcador de células. Afortunadamente, las propiedades que hacen al ^{99m}Tc y otros radionucleidos de particular interés en el diagnóstico por imágenes - fotones de baja energía y una baja proporción de radiación B -, también simplifica la manipulación en el laboratorio.-

Los problemas de radioprotección, (a parte del trabajo clínico en sí mismo), involucran : transporte, almacenamiento, preparación del radiofármaco, administración al paciente, disponer de los desechos radiactivos y de los desechos del paciente que contengan radiactividad residual.

Por lo tanto, existirán áreas de trabajo separadas para la preparación en forma ascéptica del radiofármaco, de los productos marcados de la sangre y de otros procedimientos, especializados y para la preparación de las dosis orales de ^{131}I en casos de terapia e investigación en tiroides.- Cada área tendrá sus propios problemas de radioprotección.-

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@

BIBLIOGRAFIA:

Recommendations of the ICRP, 1990.

Menossi, Carlos. Protección Radiológica. Curso ARCAL de Capacitación para Capacitadores de Cursos de Metodología de Radioisótopos Orientados al Radioinmunoanálisis. C.N.E. Argentina, 11/88.-

Campos de Kremer. Protección Radiológica. Curso sobre Producción y Control de Radiofármacos. Fac. de Química. Uruguay, 1983.-

Una Realidad las Radiaciones. Publicación del OIEA. 1981.-

Trott, N.G.

1. Todos los valores se relacionan con la radiación incidente en el cuerpo o por radiaciones internas emitidas por la fuente.