

4. Radiación

4.1 Interacción de la radiación con la materia.

Debido a que los fotones no tienen ninguna carga eléctrica, no interactúan con cargas eléctricas, y por lo tanto, con la materia que está compuesta de cargas eléctricas. La probabilidad de interacción y las formas de interacción de un fotón con la materia dependen mucho de la energía del fotón. Aquí estamos interesados sólo en la interacción de los fotones de alta energía (rayos X y gamma) con la materia.

La probabilidad de interacción de los rayos X o gamma con un átomo es, en general, muy pequeña comparada con la de las partículas de alta energía cargadas. Como consecuencia los rayos X o gamma tienen más poder penetrante que las partículas de alta energía cargadas.

4.1.1 Atenuación y transmisión de rayos X y gamma.

Consideremos un simple experimento en el que un haz paralelo de rayos X o gamma de una energía dada (E_x) incide en una delgada lámina de 1 cm^2 y x cm de espesor. Cuando un rayo X pasa a través de esta lámina, pueden ocurrir tres cosas:

1. El rayo puede ser completamente absorbido por el material.
2. El rayo puede ser desviado con poca o ninguna pérdida de energía.
3. El rayo puede pasar a través de la lámina sin ninguna interacción.

Los dos primeros procesos juntos se llaman atenuación; el tercero se llama transmisión. La transmisión de rayos X de una energía dada, E_x , a través de un grosor x , en el experimento mencionado, depende sólo de la naturaleza del material (densidad y número atómico) y del espesor x de la lámina. Para un material dado, la dependencia del espesor x , puede ser determinado experimentalmente midiendo el número de rayos X (sin ninguna pérdida de energía o deflexión) transmitidas a través de diferentes espesores de la lámina. Los datos resultantes de este experimento se pueden relacionar con precisión mediante la siguiente expresión matemática:

$$\frac{N_x}{N_0} = e^{-u(\text{linear})x}$$

en donde N_0 y N_x son, respectivamente el número de rayos incidentes en la lámina y transmitidos por el grosor x de la lámina. El coeficiente de atenuación lineal, $u(\text{linear})$, representa, en términos físicos la probabilidad de la interacción de un rayo pasando a través de la unidad de área de un material de 1 cm de grosor.

Si

$$\frac{N_x}{N_0} = \frac{1}{2} \text{ entonces } x = \text{HVL}$$

y HVL se relaciona a $u(\text{linear})$ mediante la siguiente expresión:

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{u(\text{linear})}$$

Una forma fácil de entender estas relaciones numéricas es mediante la fórmula:

$$N_x = N_0 e^{-u(\text{linear})x}$$

$$\ln(N_x/N_0) = -u(\text{linear})x$$

Efectos biológicos de la radiación.

La interacción de la radiación con los sistemas biológicos resulta en una variedad de cambios biológicos que pueden ser tanto deletéreos como benignos. Estos cambios pueden ser evidentes inmediatamente o tomar varios años o generaciones antes de manifestarse. En general, la probabilidad de la ocurrencia, tipo y severidad de estos cambios depende de muchos factores, algunos relacionados a la radiación y sus características y otros a las características biológicas del sistema.

4.2.1 MECANISMOS DE DAÑO BIOLÓGICO

Las manifestaciones de daño secundario a la radiación están siempre precedidas por una serie de eventos fisicoquímicos complejos. El primer paso en esta serie de eventos es el depósito de energía por la radiación en la forma de ionización y excitación de algunos de los átomos o moléculas del sistema biológico. Esto generalmente tarda cerca de 10^{-12} segundos o menos. El segundo paso es la transferencia de energía tanto a las moléculas vecinas (inter-molecular) o, más frecuentemente, dentro de la molécula en sí (intra-molecular) para formar varias especies químicamente activas y de vida corta conocidas como radicales libres. Este proceso puede tardar desde 10^{-12} segundos hasta 10^{-3} segundos. En la siguiente etapa los radicales libres reaccionan entre ellos mismos, o más significativamente, con biomoléculas (por ejemplo: DNA, RNA) para producir alteraciones en ellas. Este proceso puede tardar desde milisegundos hasta varios segundos. El paso final es el daño biológico que se puede manifestar en un corto periodo o puede tardar en aparecer varias generaciones, dependiendo del tipo y función de estas moléculas alteradas.

EFFECTOS DE LA RADIACION.

Los efectos de la radiación ionizante pueden clasificarse en dos grupos:

a) Efectos no estocásticos: Aquellos efectos que se producen a partir de una dosis de umbral y aumentan en severidad con la dosis. Para dosis altas recibidas en un tiempo corto el efecto se agudiza.

b) Efectos estocásticos: Aquellos efectos que aparentemente no tienen una dosis de umbral a partir de la cual se manifiestan. La probabilidad de que ocurra el efecto independientemente de su severidad se considera una función de la dosis.

Cuando los efectos se manifiestan en el individuo que se ha expuesto a la radiación ionizante se denominan efectos somáticos, estos pueden ser no estocásticos, como son por ejemplo: La esterilidad, cataratas, depleción de células en la médula ósea, o bien,

estocásticos, por ejemplo: la inducción de cáncer.

Si los efectos no se presentan en el individuo expuesto, sino afectan a sus descendientes, se denominan efectos hereditarios o genéticos y son estocásticos (alteraciones genéticas, por ejemplo).

EFFECTOS NO ESTOCÁSTICOS:

La dosis de umbral para algunos efectos no estocásticos, cuando la irradiación es a cuerpo total se presenta en la siguiente tabla.

Dosis en mSv	Efecto
>100	Rupturas cromosómicas en células sanguíneas. Interferencia con la organogénesis de embriones.
>250	Cambios sanguíneos.
>500	Probable retención momentánea de la espermatogénesis.
>1000	Síndrome de radiación probable.
>2000	Síndrome grave de radiación.
>4000	50 % de probabilidad de muerte.
>6000	100 % de probabilidad de muerte

A dosis altas la sobrevivencia de una persona depende de la competencia entre la reproducción y la muerte celular, la capacidad de recuperación del organismo humano permite que a una dosis de 3 Sv (300 rads) se tenga una sobrevivencia mayor de 90%.

Los síntomas del síndrome de radiación son: Náuseas, vómitos, agotamiento, disminución de glóbulos blancos, período de recuperación aparente, vómito y diarrea con sangre, disminución de glóbulos blancos y plaquetas, anemia y finalmente intoxicación general.

El tiempo que tardan en presentarse los síntomas depende de la magnitud de la dosis y del intervalo de tiempo en que se imparta ésta, es decir, cuando la dosis se imparte en un tiempo mayor el efecto es menor, como si el organismo recibiera una dosis menor.

En el caso que la irradiación no sea en

todo el cuerpo sino localizada en una parte de él, el daño depende de la magnitud del área y de los órganos expuestos, algunos de estos efectos, cuando la dosis de recibe en una sola exposición, se presentan en la siguiente tabla:

Parte del cuerpo	Dosis	Daño
Gónadas	0.5 Sv (50 rads)	Esterilidad temporal
Gónadas	8.0 Sv (800 rads)	Esterilidad definitiva
Cuero Cabelludo	5.0 Sv (500 rads)	Caída del pelo temporal
Cuero Cabelludo	25 Sv (2500 rads)	Caída del pelo definitiva

EFFECTOS ESTOCASTICOS.

Inducción de Leucemia:

Los datos experimentales con seres humanos a este respecto fueron obtenidos de los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki, de pacientes irradiados con rayos X, de la exposición de médicos radiólogos y de niños irradiados en útero por examen de la madre. Las conclusiones obtenidas son:

- Se ha observado una relación lineal entre la frecuencia de ocurrencia y la dosis, cuando se trata de dosis altas. A dosis bajas no se puede asegurar lo mismo, pero para efectos de protección radiológica se supone también lineal.
- Se presenta un pico en la frecuencia después de 10 años de que ocurrió la irradiación.
- Después de 15 a 20 años de producida la irradiación la frecuencia baja a sus valores normales.
- El incremento original en la frecuencia es de 1×10^{-6} año-rad, o sea que el total de extraleucemias producidas por cada rad sería de 15 ó 20×10^{-6} .

Debe hacerse notar que la frecuencia natural de contraer leucemias es de 5×10^{-5} /año, o sea que para un período de 20 años es de 10^{-3} .

De lo anterior puede inferirse que si se supone que una población se irradia de manera que cada habitante reciba 1 rad, podrían producirse 1020 casos de leucemia por millón de habitantes en un periodo de 20 años contra los 1000 casos que deberían producirse de manera natural en el mismo periodo.

Inducción de otros cánceres.

La exposición a la radiación ionizante también produce incremento en la frecuencia de otros tipos de cáncer diferentes a la leucemia, aunque es difícil establecer una regla general de aumento de la frecuencia, ya que el efecto depende fuertemente de la localización de la irradiación.

Se ha observado incremento en la incidencia de cáncer del pulmón en los mineros debido a la exposición al gas radón y sus descendientes, de cáncer de huesos en los pintores de carátulas radioluminiscen-tes, de cáncer de tiroides en personas irradiadas con rayos X ó con I^{131} , para este tipo de cáncer se considera 100×10^{-6} extracasos/rad para niños irradiados externamente con rayos X o gamma, 30×10^{-6} /rad para niños irradiados internamente con I^{131} y 10×10^{-6} /rad para adultos irradiados internamente con I^{131} . En resumen, para fines de seguridad radiológica se considera que el incremento en la incidencia de todos los tipos de cáncer, excepto leucemia, es aproximadamente de 80×10^{-6} extracasos/rad. La incidencia natural por millón de habitantes por año señala 87 casos entre 15 y 55 años de edad y 7500 entre 53 y 65 años.

Efectos hereditarios.

A este respecto no se dispone de suficientes datos en seres humanos, por lo que las estimaciones se basan en extrapolaciones de resultados obtenidos con animales de laboratorio, por lo que se debe tener en cuenta las limitaciones e imprecisiones de la extrapolación. El daño consiste en un aumento en la carga de mutaciones y anormalidades cromosómicas que pueden manifestarse en un aumento en la incidencia de defectos congénitos, una elevada mortalidad infantil y juvenil, una alteración del número de hombres respecto al de mujeres, o cambios en la velocidad del crecimiento y desarrollo.

Acortamiento de la vida.

Actualmente, el conocimiento de este efecto sobre seres humanos es vago. La Comisión Internacional de Protección radiológica después de estudiar la sobrevivencia de las poblaciones de Hiroshima y Nagasaki considera que la evidencia no es concluyente, pero la posibilidad de que pequeñas dosis de radiación tengan un efecto no específico y deletéreo sobre la esperanza

de vida no se excluye; sin embargo, no es suficiente para justificar el hacer una estimación cuantitativa del riesgo. Se podría inferir que uno de los efectos de la irradiación es un acortamiento del promedio de vida.

MAGNITUDES USADAS EN PROTECCION RADIOLOGICA

MULTIPLICOS

exa	E	10^{18}	trillón
peta	P	10^{15}	mil billones
tera	T	10^{12}	billón
giga	G	10^9	mil millones
mega	M	10^6	millón
kilo	K	10^3	mil
hecto	h	10^2	cien
deca	da	10^1	diez

SUBMULTIPLICOS

deci	d	10^{-1}	décimo
centi	c	10^{-2}	centésimo
mili	m	10^{-3}	milésimo
micro	u	10^{-6}	millonésimo
nano	n	10^{-9}	mil millonésimo
pico	p	10^{-12}	billonésimo
femto	f	10^{-15}	mil billonésimo
atto	a	10^{-18}	trillonésimo

Toda magnitud física se expresa en términos de un número y una unidad, por ello es necesario distinguir perfectamente entre el concepto de magnitud o cantidad y el de unidad. Una cantidad física (o magnitud) caracteriza un fenómeno físico en términos adecuados para expresarlo numéricamente; así, por ejemplo al hablar de longitud, masa, volumen, presión, corriente eléctrica, etc., nos referimos al concepto de la característica medible de la materia o de un fenómeno físico. La unidad, en cambio, es una porción de la cantidad física seleccionada arbitrariamente y que nos sirve como base de comparación para medir, ésto es, para expresar cualquier cantidad física como un múltiplo o porción de esa unidad. Así, toda cantidad física quedará expresada mediante el producto de un número y una unidad.

Actualmente se ha establecido el Sistema Internacional de Unidades (SI) con el que además de lograrse un acuerdo internacional en la definición de unidades, se tiene un sistema coherente, ésto es, un sistema en el cual existen unidades básicas, unidades derivadas

y unidades complementarias.

Existen muchas unidades que no son coherentes con el SI, que se han usado durante mucho tiempo, pero que están cada vez más en desuso: curie, roentgen, rad, rem.

Para la exposición a la radiación se emplea:

$$C \text{ Kg}^{-1}$$

Existe una unidad antigua ya en desuso, el roentgen:

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ CKg}^{-1}$$

Para las dosis absorbidas se emplea el gray (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$$

También existe una unidad antigua, en desuso, el RAD

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg g}^{-1} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

En protección radiológica es necesario contar con una relación numérica bien definida entre la dosis absorbida y el efecto biológico que produce. La dosis absorbida es insuficiente para predecir la severidad o la probabilidad del efecto bajo condiciones no especificadas, por ello se ha introducido otra cantidad que correlaciona mejor con los efectos estocásticos más importantes, en particular con los estocásticos tardíos y a los niveles bajos de dosis como los que se encuentran normalmente en protección radiológica. Esta cantidad se denomina equivalente de dosis H y se define así:

$$H = DQN \text{ J kg}^{-1}$$

en donde Q = Factor de calidad
N = producto de todos los demás factores (rapidez de dosis, fraccionamiento, etc.. Por ahora N=1)

La unidad de equivalente de dosis actual es el sievert (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$$

También existe la unidad antigua, en desuso, el REM

$$1 \text{ rem} = 100 \text{ erg g}^{-1} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

En otras palabras $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$
 $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rems}$

Factor de calidad: Este factor pretende incluir el efecto de la distribución microscópica de la energía absorbida sobre el detrimento. Se define como el poder de frenamiento por colisión. Sus valores son:

Rayos X, gamma y electrones	1
Neutrones, protones, etc. de energía desc.	10
Partículas alfa y otras de carga múltiple de energía desconocida	20

Cabe hacer notar que aunque la dosis absorbida y el equivalente de dosis tienen las mismas unidades fundamentales, es conveniente que tengan un nombre distinto para enfatizar que se trata de dos cantidades diferentes, ya que la dosis absorbida es un concepto aplicable para cualquier tipo de material e intensidad de radiación, mientras que el equivalente de dosis se refiere al posible efecto en el tejido, únicamente para intensidades bajas de radiación y solamente para fines de protección radiológica; no puede aplicarse en condiciones de accidente donde existan altas dosis, pues el factor de calidad Q sólo está definido para intensidades bajas, cercanas a los límites establecidos con fines de protección.

Filosofía y normas de protección radiológica.

La protección radiológica tiene como finalidad proteger a los individuos, sus descendientes y el medio ambiente, contra los riesgos que se derivan de las actividades que por las características de ciertos materiales o equipos que se utilizan, pueden implicar la exposición a radiaciones ionizantes.

El hombre siempre está expuesto a niveles de radiación; una de las tareas fundamentales de la protección radiológica es la de vigilar que las dosis resultantes para los trabajadores ocupacionalmente expuestos y las personas del público se conserven por abajo de valores que no presenten un riesgo para la salud, para ello se establecen límites de dosis.

Las dosis promedio recibidas por radiación natural en todas las personas es de 1.25 a 2.0 mSv/año. Se ha adoptado el criterio de suponer que el riesgo de daño por radiación es directamente proporcional a la dosis acumulada, es decir, se supone que no existe dosis umbral en la relación dosis-daño. En base a estas suposiciones conservadoras, el ICRP fijó para la dosis acumulada el límite siguiente para cuerpo total:

$$D = 5 (N - 18) \text{ rem}$$

en donde: D = Dosis en rem a cuerpo total u órgano crítico

N = Años cumplidos de la persona

se considera que no es recomendable que una persona trabaje con radiación a una edad menor de 18 años, y se puede interpretar que la dosis promedio anual es de 5 rem/año, es decir, 50 mSv/año.

Si tomamos en cuenta que el daño por radiación puede ocasionarse en algún órgano en especial, tenemos que establecer límites en consideración a los órganos críticos, entonces las dosis máximas permisibles son:

Gónadas, médula ósea roja, cuerpo total	50 mSv/año
Piel, tiroides, hueso	300 mSv/año
Manos, antebrazos, pies, tobillos	750 mSv/año
Otros órganos	150 mSv/año

La radiación recibida por el personal al trabajar con rayos X debe ser tan baja como razonablemente se pueda lograr, lo que implica una buena planeación de las actividades que han de hacerse, a fin de optimizar la metodología de trabajo para exponerse el menor tiempo y a la mayor distancia posible.

Los factores principales que se deben manejar para protegerse de la radiación son:

TIEMPO
DISTANCIA
BLINDAJE

El tiempo que la persona se exponga a la radiación debe ser el mínimo necesario para efectuar el trabajo planeado en forma segura. La distancia entre la fuente de radiación y la persona será la máxima posible en el momento del disparo, sin que ello dificulte el trabajo, al grado de requerir mucho más tiempo debido a incomodidad para efectuar la maniobra planeada. El blindaje es un material que se utiliza para atenuar la radiación, de manera que la intensidad de ésta no represente un peligro para las personas que estén cerca. Durante el trabajo normal, el personal ocupacionalmente expuesto no deberá recibir un equivalente de dosis mayor al límite establecido de 50 mSv/año.

Existen algunas medidas generales para la reducción de la radiación como son: Reducir el área irradiada al mínimo indispensable, esto se puede hacer limitando la apertura de los diafragmas de los equipos radiológicos. El segundo punto es la reducción de la dosis de radiación. A este respecto los métodos técnicos tienden a mejorar la sensibilidad en la detección de la imagen para que sea necesaria una menor cantidad de radiación. En este punto puede describirse:

1. Las hojas de refuerzo de tierras raras que permiten reducir la dosis por un factor de 3 a 5.
2. La utilización de chasis especiales que aseguran una adaptación íntima entre la placa y la pantalla.
3. La utilización del intensificador de imágenes, que puede llegar a reducir la dosis de radiación en un 75 %.
4. Supresión de las radiografías inútiles y obtener sólo las necesarias para el diagnóstico. La utilización de exposímetros automáticos son un factor influyente en la reducción del número de placas y por lo tanto en la reducción de la dosis.