

RADIACIONES IONIZANTES

Efectos biológicos y protección radiológica

La humanidad ha estado expuesta a la radiación ionizante, proveniente de fuentes naturales, desde siempre. Si bien la radiación natural no es uniforme, no se la ha podido correlacionar con algún tipo de efecto sobre la salud. Por lo tanto, o bien no se producen efectos nocivos a esos niveles de exposición, o sus 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 la exposición a fuentes artificiales. El descubrimiento de los rayos X y la identificación y aislamiento de materiales radiactivos hacia finales del siglo XIX, causaron, además de grandes beneficios, sustanciales riesgos no previstos. En sólo 5 años se registraron 170 casos de lesiones por radiación, y hasta 1922, más de 300 radiólogos habían fallecido por efecto de la sobre-exposición. A los seis meses del descubrimiento de los rayos X por Roentgen, en 1896, se informó de sus efectos nocivos: era usual que los trabajadores verificaran 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. Unos 250 murieron de cáncer cutáneo y más de 50 debido a trastornos sanguíneos, anemia y leucemia. Las radiaciones ionizantes deben ser tratadas con cuidado antes que con temor y sus riesgos deben considerarse siempre, en perspectiva con respecto a otros riesgos. Los procedimientos hoy accesibles para controlar la exposición a las radiaciones ionizantes son suficientes -si se usan adecuadamente- para minimizar el componente de riesgos al valor razonable al que todos estamos expuestos.

¿Qué es una dosis de radiación?

Recibir una dosis de radiación 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 sólo se podrán evaluar si se

sabe la cantidad de radiación recibida, y la tasa y forma en que se recibió. Por ejemplo: se puede tomar una medida de whisky y no sentir ningún efecto, pero ¿qué pasa si tomamos 10 medidas? Para saberlo hay que conocer, entre otras cosas, si los 10 vasos se bebieron en un lapso de 20 minutos o de 30 días.

La unidad de dosis absorbida -en el sistema internacional- es el Gray (Gy), equivalente a un Joule de energía por Kg de materia. Otra unidad usual es el rad (1Gy = 100 rad)

La dosis equivalente de radiación recibida por personas (la eficacia biológica relativa) se expresa en Sievert (Sv), que equivale a 100 rem, unidad anterior y aún en uso. La tasa de irradiación se expresa entonces en Sv/segundo (u otra unidad de tiempo). Por ejemplo: una radiografía de tórax equivale a unos 20 mrem; por término medio recibimos de fuentes naturales unos 100 mrem, cantidad que fluctúa según las circunstancias locales.

Los comienzos de la protección radiológica

A medida que el uso de radiaciones se fue generalizando -por ejemplo en aplicaciones médicas- resultó evidente la necesidad de reglamentar la dosis de radiación. Existen en la actualidad varias organizaciones internacionales que se ocupan de la protección radiológica. Ellas están vinculadas a distintos aspectos de la radioprotección, desde la colecta de datos científicos para la evaluación de riesgos hasta la formulación de normas y recomendaciones de protección radiológica, tanto para la población en general como para los trabajadores vinculados a actividades que involucran riesgos de exposición particulares.

Las organizaciones que dan base científica para el trabajo de protección radiológica son:

- Comisión Internacional de Protección Radiológica ([ICRP](#))
- Comité científico de las Naciones Unidas sobre el Efecto de la Radiación Atómica ([UNSCEAR](#))

¿Contra qué nos protegen?

En casos extremos de irradiación externa de todo el organismo a niveles de actividad muy elevados, durante un periodo de tiempo muy corto (por ejemplo, una sola dosis que multiplique por 3000 o 4000 la dosis anual debida a la radiación de fondo), tiene consecuencias fatales. Dosis inferiores pueden ocasionar diversos tipos de cáncer y

leucemia, cuya probabilidad disminuye con la dosis.

Esta propiedad de inducir cáncer (carcinogénica) es compartida por las radiaciones con un buen número de sustancias químicas naturales y artificiales como el amianto, los monómeros del vinilo, muchos plaguicidas y varios componentes del humo del tabaco. La exposición a las radiaciones y también a ciertas sustancias químicas puede generar también defectos genéticos (mutagenia) que se manifestarán en generaciones posteriores.

Los 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 defectos genéticos.

Para conseguir esos objetivos la ICRP ha formulado recomendaciones que se inspiran en tres principios generales:

- I) No debe adoptarse ningún procedimiento a menos que de él derive un beneficio neto positivo.
- II) Toda exposición a radiaciones ionizantes debe mantenerse al nivel más bajo que razonablemente se pueda conseguir, después de tener en cuenta los factores económicos y sociales (Principio ALARA, As Low As Reasonably Achievable).
- III) Los que por ejercicio de su profesión se hallan expuestos a las radiaciones no deben recibir una dosis superior a los 20 mSv al año. Para la población general la dosis no debe superar 1,0 mSv al año, ni un promedio de 20 mSv anuales durante toda su vida.

Los límites señalados corresponden a máximos que no se deben sobrepasar. Es común que los países que aceptan estas recomendaciones fijen límites aún más rigurosos que los recomendados. Basándose en estas recomendaciones de la ICRP y en consulta con la [OMS](#), la [OIT](#), la [FAO](#) y otros organismos, el [OIEA](#) (Organismo Internacional de Energía Atómica) elabora normas básicas de seguridad en materia de protección radiológica que se utilizan como referencia en las legislaciones nacionales.

Aunque los efectos de las radiaciones no son completamente conocidos, sí se conocen ciertos factores que influyen en el efecto nocivo de las mismas, entre los

principales:

- Tipo y energía de la radiación
- Poder de penetración
- Ionización específica
- Período de semidesintegración
- Período biológico
- Período efectivo

Aspectos biológicos y clasificación de los efectos de las radiaciones

El proceso de ionización cambia necesariamente a los 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, no se reproduzca o resulte una célula viable pero modificada. Las opciones tienen implicancias profundamente diferentes 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, las funciones normales del tejido se verán afectadas. El riesgo será prácticamente nulo a dosis pequeñas, pero por encima de determinada dosis (el umbral) crecerá hasta alcanzar la unidad (100%). Por encima del umbral el daño crecerá con la dosis. Estos efectos se llaman **no estocásticos**, o “determinísticos”. Sus umbrales suelen ser dosis de una fracción de Gray al año como puede verse en el cuadro 1:

Cuadro N°1: Efectos e Importancia biológica según dosis de radiación ionizante en seres humanos

A) Exposición local

Dosis por exposición única a la radiación electromagnética		Efecto esperado o Importancia biológica
Gy	RAD	
30	3000	Necrosis de piel (dosis para radioterapia del cáncer)
5-10	500-1000	Aparición de eritemas (enrojecimiento) en la piel
3-6	300-600	Depilación

B) Exposición de cuerpo entero

Dosis por exposición única a la radiación electromagnética		Efecto esperado o Importancia biológica
Gy	RAD	
4	400	50% de mortalidad (radiación γ)
0,75-1,50	75-150	Cambios en el cuadro sanguíneo. Posible daño agudo
0,25-0,75	25-75	Cambios en el cuadro sanguíneo. Ausencia de daño severo (en general)

El resultado es muy diferente si la célula irradiada se modifica pero no muere. A pesar de la existencia de mecanismos de defensa altamente efectivos, el clon de células resultantes de la reproducción de células somáticas viables modificadas, después de un período prolongado y variable llamado “período de latencia”, puede manifestar una condición maligna, ésto es: cáncer.

La **probabilidad** de contraer cáncer como resultado de la exposición a la radiación, **aumenta con la dosis**, tal vez -aún no hay datos definitivos- no necesite alcanzar un umbral. La **severidad** del cáncer **no es afectada por la dosis**.

Estos efectos se llaman **estocásticos**, lo que significa “al azar”, de naturaleza estadística. Tanto los efectos somáticos como las enfermedades malignas, así como los efectos hereditarios son considerados estocásticos para el rango de dosis considerado en protección radiológica. Aunque para dosis bajas no se conoce con certeza la forma de la curva dosis-efecto, se supone que los efectos estocásticos sin umbral son proporcionales a la dosis recibida. Es característico de estos efectos su aparición retardada, a largo plazo y no se conoce ningún método para reducir la probabilidad de su aparición una vez recibida la dosis.

Salvo en casos -afortunadamente muy escasos- como los accidentes serios en centrales nucleoelectricas, el extravío de material radiactivo o la utilización bélica de armas nucleares, es muy improbable que la población se vea expuesta a dosis de tal magnitud que conduzcan a efectos determinísticos inmediatos. Por ello, la principal preocupación debe centrarse en los efectos a largo plazo, como la incidencia del cáncer en trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.

Dosimetría

Dosis absorbida (D)

La magnitud dosimétrica fundamental en protección radiológica es la *Dosis Absorbida*; esto es la energía absorbida por unidad de masa.

$$D = dE/dm$$

dE es la energía aportada por la radiación ionizante a la materia en una muestra de volumen determinado; dm es la masa de la muestra. En el sistema Internacional (SI) la dosis tiene como unidad Joule/Kg, la que recibe el nombre de Gray (Gy).

Pese a que podría especificarse la Dosis Absorbida para un punto cualquiera de la muestra irradiada es de mayor utilidad considerar la dosis promedio recibida por un tejido u órgano. El valor de este promedio es un indicador de la probabilidad de aparición efectos estocásticos subsecuentes si aceptamos que la relación dosis/respuesta es lineal. Recordemos que la relación dosis/respuesta no es lineal para efectos determinísticos (no estocásticos) por lo que conocer su promedio no es relevante para estos efectos a menos que esté uniformemente distribuida en el órgano o tejido.

La derivada de la dosis absorbida con respecto al tiempo es la Tasa de Dosis Absorbida.

$$D' = dD/dt$$

Dosis en un órgano o tejido (D_T)

A los efectos de la protección radiológica es útil definir la dosis absorbida en promedio por un órgano o tejido (D_T). Esto se debe a que los efectos de las radiaciones varían considerablemente de un tejido/órgano a otro.

$$D_T = E_T/m_T$$

E_T es la energía total recibida por el órgano o tejido y m_T es la masa de ese órgano o tejido.

Factor de ponderación de la radiación (W_R)

La probabilidad de aparición de efectos estocásticos no sólo depende de la dosis absorbida, sino también del tipo y energía de la radiación que causa esa dosis. Para contemplar este hecho, se multiplica la dosis absorbida por un factor relacionado a la calidad de la radiación. La dosis absorbida así ponderada se llama **dosis equivalente** (H).

Cuadro N°2: Revisión de definiciones, conceptos y unidades

NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDADES	OBSERVACIONES
Dosis absorbida	D	Gy, rad	$D = dE/dm$ $1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$
Tasa de dosis	D'	Gy/h	$D' = dD/dt$
Dosis equivalente	$H_{T,R}$	Sv, rem	$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$ $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

Dosis equivalente en un órgano o tejido (H_T)

Es la dosis promedio absorbida por 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 de radiación incidente. La dosis equivalente total en un tejido está dada por la expresión:

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

Donde $D_{T,R}$ es la dosis promedio absorbida por el órgano o tejido debido a la radiación R. Como W_R no tiene unidades, la unidad de la dosis equivalente H_T es J/Kg pero para diferenciarla de la dosis absorbida, cuya unidad es el Gray (Gy), en el caso de H_T la unidad se denomina Sievert (Sv).

El factor de ponderación es seleccionado para que sea representativo del *efecto biológico relativo* (EBR) de la radiación considerada. Cuando un órgano o tejido es irradiado por emisiones de diverso tipo y energía debe considerarse que la dosis equivalente total es la sumatoria de los aportes ponderados de cada una de esas radiaciones.

Cuadro N°3: Factores de ponderación de radiación (W_R)

TIPO DE RADIACIÓN Y RANGO DE ENERGÍA	W_R
Fotones (todas las energías)	1
Electrones y muones (todas las energías)	1
Neutrones ($E < 10$ KeV)	5
Neutrones (10 KeV a 100 KeV)	10
Neutrones (100 KeV a 2 MeV)	20
Neutrones (2 MeV a 20 MeV)	10
Neutrones ($E > 20$ MeV)	5
Protones ($E > 2$ MeV)	5
α , fragmentos de fisión, núcleos pesados	20

Factor de ponderación de tejido (W_T) y Dosis Efectiva (E)

La relación entre la probabilidad de aparición de efectos estocásticos y la dosis equivalente depende también del órgano o tejido irradiado. La dosis efectiva (E) es una dosis absorbida doblemente ponderada ya que contempla el tipo de radiación, la energía que porta y el órgano o tejido afectado. El valor de E viene dado por la expresión:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T$$

H_T , es la dosis equivalente para un órgano o tejido dado y W_T es el factor de ponderación para el tejido, T.

Cuadro N°4: Factores de ponderación según tejido/órgano (W_T)

TEJIDO U ÓRGANO	W_T
Gónadas	0,20
Médula ósea	0,12
Pulmón	0,12
Vejiga	0,05
Mama	0,05
Hígado	0,05
Tiroides	0,05
Hueso	0,01
Resto	0,05

Conclusión

La exposición a radiaciones ionizantes implica riesgos indudables para la salud humana. Sin embargo, el cumplimiento de las normas, recomendaciones y protocolos elaborados por organismos internacionales y avalados por rigurosas investigaciones científicas permiten, reducir a un mínimo aceptable el riesgo de sufrir efectos agudos, así como prevenir la aparición de efectos estocásticos, tanto en la población general como en los trabajadores especializados.

Que no existe actividad exenta de riesgos es un hecho indiscutible. Tal vez el cuadro que sigue permita ponderar en su justo término los potenciales efectos nocivos de las radiaciones si se los compara con los asociados a otras actividades.

Cuadro N°5:

Estimación de días de vida perdidos por accidentes laborales

TIPO DE ACTIVIDAD	Días de vida perdidos por accidentes laborales (estimación)
Industria en general	74
Comercio	30
Manufactura	43
Gobierno	55
Transporte	164
Agricultura	277
Construcción	302
Minería y canteras	328
Exposición accidental a radiaciones	<1
Dosis de 5 mSv/año por 50 años	25
Dosis de 50 mSv/año por 50 años	250
Accidentes en centrales nucleares sin exposición a la radiación	58

Fuente: “Temas, aplicaciones y experiencias en Radioquímica a desarrollar en cursos de Química de Enseñanza Secundaria” (Curso 1998)

- I.Q. Laura Fornaro (docente responsable)
 - Q.F. Andrés Nappa
 - Dr. Eduardo Savio
 - Dra./Q.F. Cristina Ures
 - Bach. en Química Miguel Jelen
 - Q.F. Mariella Terán
-
- Cátedra de Radioquímica. Facultad de Química (UDELAR)
 - Asociación de educadores en Química
 - Pedeciba

Edición y adecuación: Uruguay Educa