

CAPÍTULO 2

Nociones básicas de radiaciones y magnitudes radiológicas

Melisa Nicoud

Figura 2.1



Senderos ondulados.

Introducción

Los efectos biológicos de la radiación, son la consecuencia de una serie de sucesos debidos al pasaje de este agente a través del organismo, en el cual van depositando su energía y produciendo diversos eventos físicos y químicos. Inicialmente se producen ionizaciones y excitaciones de los átomos que se interponen a la trayectoria de la radiación. Estas perturbaciones físicas conducen a reacciones fisicoquímicas, luego a reacciones químicas y finalmente a efectos biológicos. Junto con la caracterización de las radiaciones, en este capítulo se describen brevemente sus mecanismos de interacción con la materia y las principales magnitudes radiológicas que permiten tener en cuenta el efecto biológico y el potencial riesgo de las radiaciones ionizantes.

Caracterización de las radiaciones

La radiación es la propagación de energía en forma de partículas subatómicas y de ondas electromagnéticas a través del vacío o de un medio material. Independientemente de esta naturaleza corpuscular u ondulatoria, si la radiación transporta la energía suficiente para ionizar el medio que atraviesa, constituye una radiación ionizante. En caso contrario, se habla de radiación no ionizante.

La *radiación ionizante* (RI) está constituida de partículas con o sin carga eléctrica y es aquella con la capacidad de causar ionización, es decir, con la energía suficiente para arrancar un electrón orbital. En este proceso se produce un par iónico, formado por el electrón eyectado y un ion con carga positiva. Se clasifica a la RI como: a) directamente ionizante, si está constituida por partículas con carga eléctrica como los electrones, partículas β^- , β^+ , protones, deuterones y partículas alfa que interactúan directamente con los electrones repeliéndolos o atrayéndolos según la carga que tenga la partícula incidente. b) indirectamente ionizante si está constituida por partículas sin carga eléctrica, propiamente fotones y neutrones quienes luego de su interacción con la materia, ponen en movimiento a partículas con carga que serán las que finalmente produzcan ionizaciones.

La *radiación corpuscular* corresponde a partículas tales como electrones, protones, partículas α , iones pesados con carga y neutrones. Los electrones son partículas pequeñas con carga negativa. Los protones son partículas con carga positiva y una masa mil veces mayor que la del electrón. Las partículas α son núcleos de helio, es decir están formadas por dos protones y dos neutrones y en consecuencia tienen una carga neta positiva. Los neutrones son partículas sin carga eléctrica, con una masa similar a la del protón y pueden ser emitidas por fisión de isótopos radiactivos de elementos pesados.

La *radiación electromagnética* transporta energía a través de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que viajan a la velocidad de la luz c (3×10^8 m/s). Sin embargo, en algunos casos, este tipo de radiación puede comportarse como un paquete discreto de energía llamado fotón o

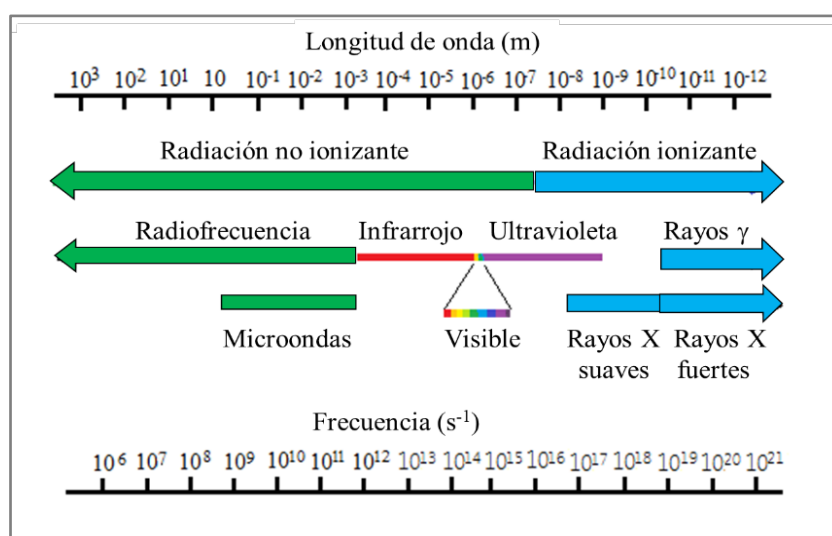
cuanto de energía. La energía de cada cuanto, medida en Joules, es igual a la frecuencia ν multiplicada por la constante de Planck, h

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Donde λ corresponde a la longitud de onda.

La cantidad de energía por fotón queda definida por la posición en el espectro electromagnético (Figura 2.1).

Figura 2.1. Espectro Electromagnético. Muestra la relación entre la longitud de onda (m) y la frecuencia (s^{-1}).



Se puede observar que los fotones de rayos X o gamma están en el extremo del espectro, caracterizado por presentar alta energía, la cual es suficiente para desplazar un electrón de su orbital atómico, produciendo un átomo con carga neta positiva. La energía de enlace para electrones ronda en los 10 eV. Los fotones con energías mayores a este valor son considerados como radiación ionizante, mientras que los que tienen energías inferiores son no ionizantes pero pueden causar excitación.

Dentro del espectro electromagnético, los rayos X y gamma pueden ser considerados particularmente, desde el punto de vista de sus aplicaciones clínicas, debido a que presentan propiedades físicas similares, a pesar de que se producen por mecanismos diferentes. Los rayos X se generan de dos formas diferentes. Una está dada por los rayos X de *Bremsstrahlung* o radiación de frenado y el otro por los rayos X característicos. Los primeros son el resultado de la interacción entre electrones de alta velocidad con los núcleos atómicos. El electrón, mientras va pasando cerca de un núcleo, es desviado de su camino debido a la acción de la fuerza de atracción coulombiana que le ejerce el núcleo, y pierde energía en forma de radiación de frenado. El segundo proceso, ocurre cuando un electrón interactúa con los átomos del material, eyectando un electrón orbital de las capas orbitales K, L o M, dejando al átomo en un estado ionizado. Cuando

se crea esa vacante en la órbita, es ocupada por un electrón perteneciente a una órbita más externa. Al hacerlo, emite energía en forma de radiación electromagnética, llamada *radiación característica*, ya que es particular de los átomos que componen el material y de las órbitas entre las que ocurre el proceso. En cuanto a los rayos gamma, su emisión está originada por los cambios de energía dentro de un núcleo. En general ocurren luego de que éste emite una partícula alfa o beta, haciendo que quede en un estado excitado de energía, la cual luego se pierde por emisión de radiación electromagnética de alta frecuencia.

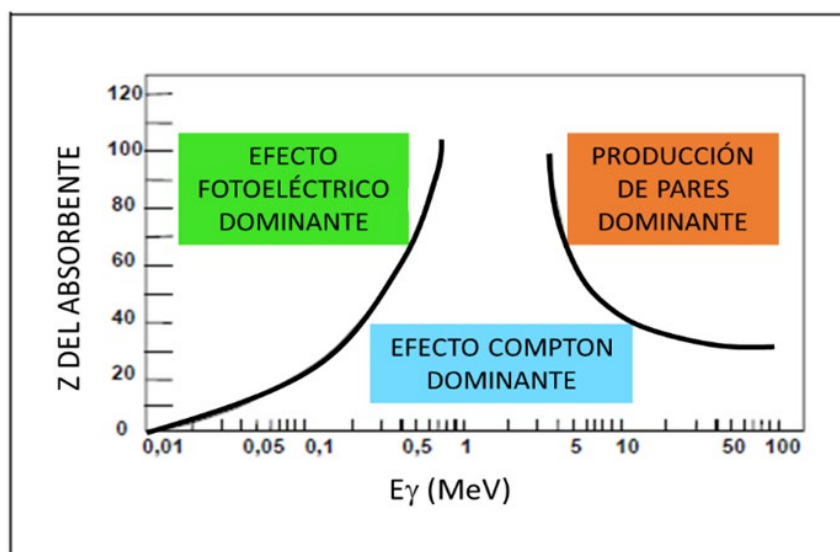
Mecanismos de interacción de la radiación con la materia

Comprender cómo interactúan las radiaciones físicamente con la materia, es importante porque es el primer paso en la secuencia de acontecimientos que finalmente conducirán a diversos cambios biológicos.

Interacción de la radiación electromagnética con la materia

Existen cinco tipos diferentes de interacciones de la radiación electromagnética con la materia: la fotodesintegración, la dispersión coherente (o dispersión Rayleigh), el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares. En este capítulo se abordarán los tres últimos por ser los de mayor relevancia. Cada uno de ellos, predomina en determinado rango de energía de la radiación incidente, para un material dado. La Figura 2.2 muestra la importancia relativa de estos procesos en función de la energía de los fotones incidentes y del número atómico Z del material absorbente.

Figura 2.2



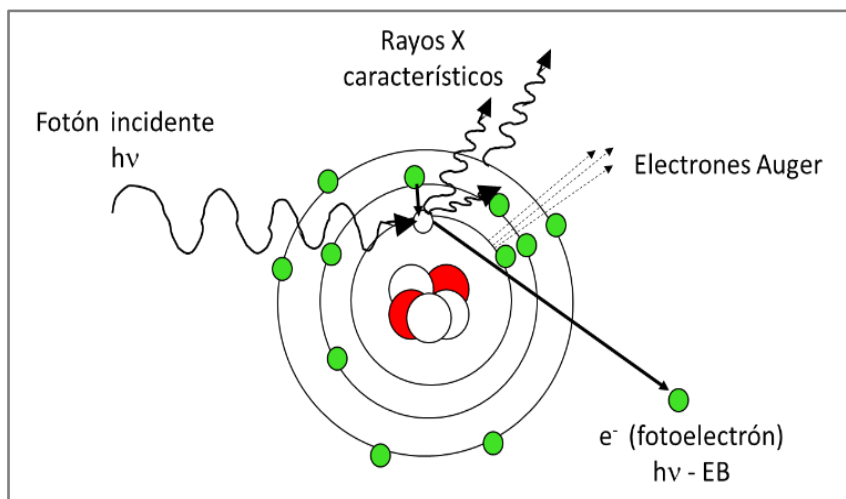
Nota. Importancia relativa de los tres principales mecanismos de interacción de fotones en función de la energía y el material absorbente

Efecto fotoeléctrico

Es un fenómeno en el cual un fotón interactúa con un átomo y eyecta uno de los electrones de un orbital atómico. En este proceso, la cantidad de energía $h\nu$ del fotón incidente se transfiere por completo al electrón. Luego de que el electrón es arrancado del átomo, queda una vacante en ese orbital, dejando al átomo en un estado excitado. Esta vacante puede ser llenada por un electrón de un orbital más externo emitiendo un rayo X característico. También puede ocurrir la emisión de electrones Auger, los cuales son electrones monoenergéticos, producidos por la absorción interna de un rayo X característico (Figura 2.3).

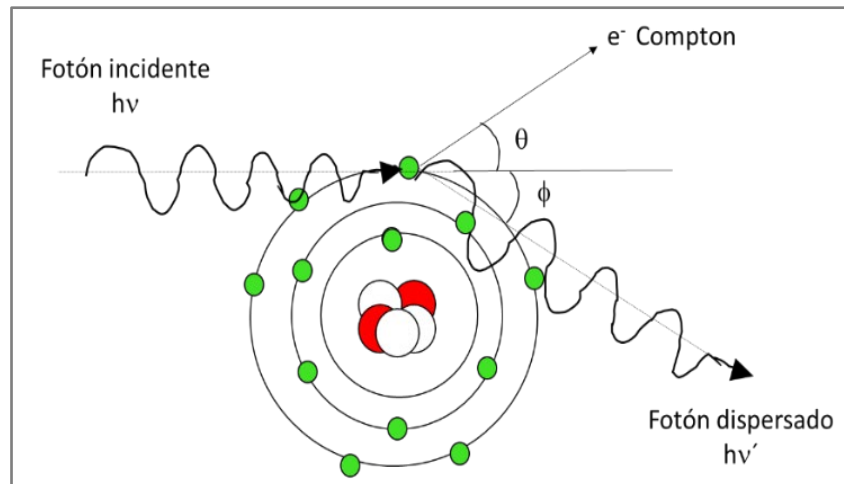
Claramente, el efecto fotoeléctrico juega un papel muy importante en la causa de los efectos biológicos, debido a que el electrón eyectado interactúa cientos de veces dentro del tejido antes de detenerse completamente y en la mayoría de estas ocasiones, la energía impartida a otras moléculas biológicas será suficiente para ionizarlas.

Figura 2.3. Esquema representativo del Efecto Fotoeléctrico con posterior emisión de rayos X característicos y electrones Auger.



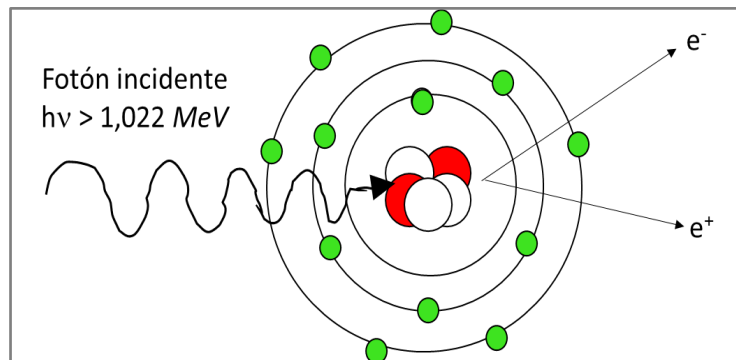
Efecto Compton

A medida que la energía del fotón incidente aumenta, su longitud de onda decrece y hay una mayor probabilidad que interactúe con los electrones individuales y no con el átomo en su conjunto, como en el efecto fotoeléctrico. En este caso interactúa con un electrón del átomo como si se tratara de un electrón libre, lo cual significa que la energía de enlace del electrón es mucho menor que la energía del fotón incidente. Aquí el electrón recibe algo de la energía $h\nu_0$ que trae el fotón y es emitido formando un ángulo θ con la dirección del fotón incidente. El fotón queda con menor energía, $h\nu'$, y es dispersado formando un ángulo ϕ . Este fotón dispersado puede seguir interactuando en el material por efecto fotoeléctrico o efecto Compton (según la energía) o seguir sin interactuar (Figura 2.4)

Figura 2.4. Esquema representativo del Efecto Compton.


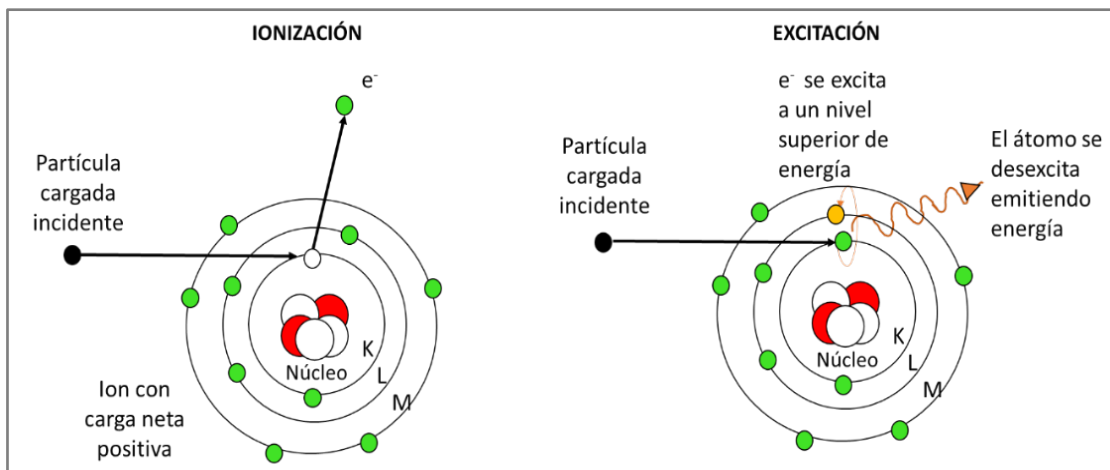
Producción de Pares

En este mecanismo de interacción se absorbe toda la energía del fotón incidente y ocurre cuando esta energía alcanza el doble de la energía en reposo de los electrones (0,511 MeV). En este proceso el fotón interactúa fuertemente con el campo electromagnético de un núcleo atómico cediendo toda su energía en la creación de un par electrón (e^-) - positrón (e^+) (Figura 2.5). La producción de pares es un evento en el cual toda la energía es convertida en masa como predice la ecuación de Einstein $E = mc^2$. El proceso inverso tiene lugar cuando un positrón se combina con un electrón para producir dos fotones, tal proceso se denomina aniquilación.

Figura 2.5. Esquema representativo de la Producción de pares.


Interacción de las partículas cargadas con la materia

Cuando las partículas cargadas atraviesan la materia van perdiendo su energía en sucesivos eventos de interacción que involucran a la ionización, excitación (Figura 2.6), ruptura de enlaces químicos (disociación) y producción de radiación de frenado. Cada uno de estos eventos, algunos más importantes que otros, representa un sitio potencial de daño químico y biológico.

Figura 2.6. Procesos de colisión inelástica de una partícula cargada con electrones del átomo.

A continuación se definen algunos conceptos importantes que son válidos tanto para la radiación electromagnética como para partículas.

Transferencia lineal de energía

La pérdida de energía de una partícula por unidad de longitud es conocida como transferencia lineal de energía o LET (del inglés *linear energy transfer*) y corresponde a la energía absorbida o transferida al medio por una partícula o radiación por unidad de trayectoria recorrida, en el medio con el que interactúa. Las radiaciones electromagnéticas tienen baja probabilidad de interacción con un átomo y los sucesos de ionización ocurren separadamente en tiempo y espacio, mientras que las radiaciones corpusculares, que tienen masa y carga, tienen más probabilidades de interacción con la materia. Consecuentemente, las radiaciones electromagnéticas tienen mayor penetración pero generan menor LET, en tanto que las corpusculares tienen un poder de penetración menor. Las partículas cargadas, al generar más iones y penetrar menos en los tejidos, producen un daño biológico mayor, a nivel superficial, en tanto que los rayos X o gamma, al generar pocos iones en su trayecto y penetrar hondamente, pueden producir lesiones simples pero de vital importancia, por ejemplo para el ADN. En este sentido, resulta apropiado definir los conceptos de ionización total, ionización específica y rango.

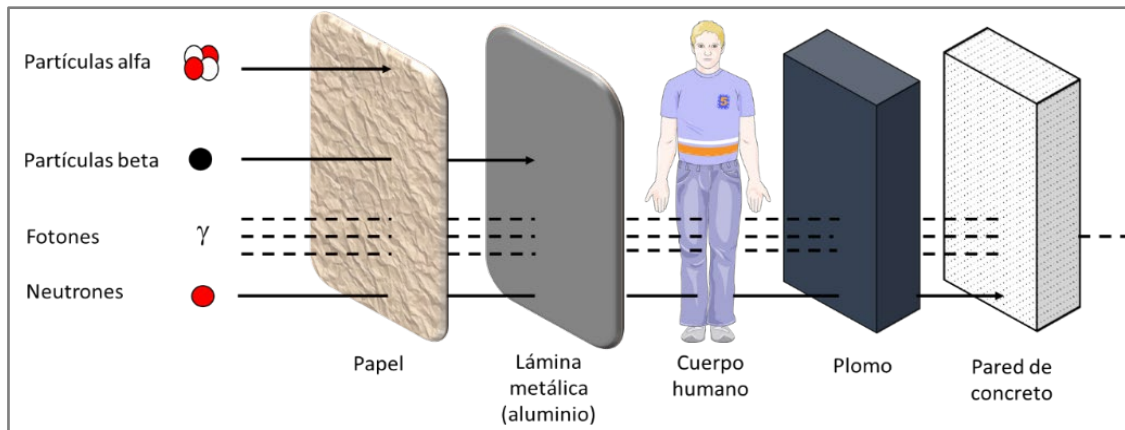
Ionización total y específica

La ionización total se define como el número de pares iónicos producidos por una radiación (partícula o fotones) a lo largo de su trayectoria, mientras que la ionización específica es el número de pares de iones que produce una radiación por unidad de longitud de trayectoria recorrida.

Rango

Se define como la distancia recorrida por las partículas hasta detenerse en un determinado medio. Esa distancia es el espesor máximo de penetración en dicho medio absorbente. Queda definido solo para partículas, dado que el rango o alcance para fotones es infinito (Figura 2.7).

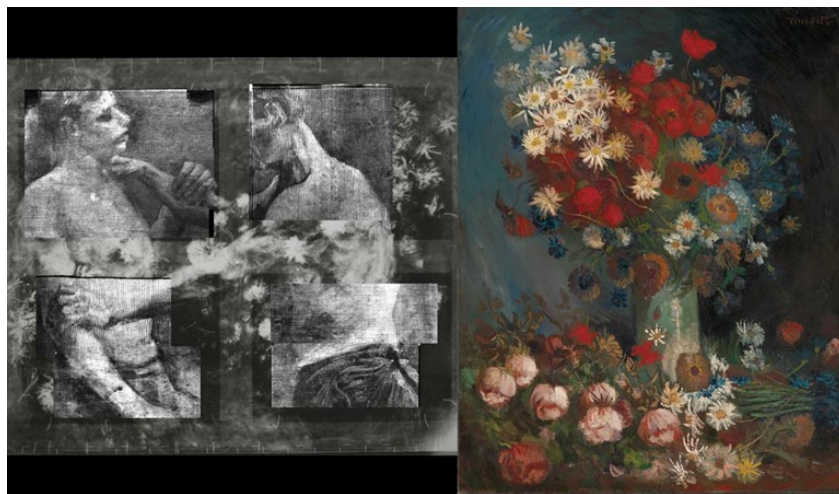
Figura 2.7. Poder de penetración de distintos tipos de radiación.



¿Lo esencial es invisible a los ojos?

El 8 de noviembre de 1895, en su laboratorio en Würzburg, Alemania, Wilhelm Conrad Roentgen estaba siendo testigo de un fenómeno que cambiaría la forma de ver las cosas no sólo en la medicina, sino en múltiples ámbitos tales como ingeniería, genética, aeronáutica, cuidado del medioambiente e inclusive en el estudio de piezas de arte. La capacidad de los rayos X de atravesar la materia depende de la energía de los propios rayos y de las propiedades y la densidad del material que se quiera analizar. Así, cuanto mayor sea el número atómico del elemento, habrá un número mayor de electrones que interactúen y atenúen la radiación impidiendo que ésta atraviese el material. Por eso, los rayos X pueden atravesar la piel formada por material orgánico bajo peso molecular como el carbono, pero son absorbidos en mayor medida por los huesos que tienen un alto contenido de calcio (Busch 2016)

Figura 2.8. Naturaleza y Arte.



Nota. Cuadro "Naturaleza muerta floral con amapolas y rosas" de Vincent Van Gogh (1886). Fotografía obtenida del sitio web oficial del Museo Kröller-Müller. El cuadro de la derecha se exhibía en el museo holandés Kröller-Müller y su autoría se atribuía a un artista anónimo, sin embargo, se sospechaba que podría tratarse de un cuadro de Vincent Van Gogh. La pintura fue sometida a rayos X en el 2012 y los expertos descubrieron que está pintado encima de otro cuadro en donde se aprecian dos hombres practicando lucha libre. En una de las tantas cartas que Van Gogh le escribió a su hermano Theo, le cuenta que durante su estancia en la Escuela de Bellas Artes de Amberes en Bélgica, había retratado a dos hombres peleando con el torso desnudo (Museo Kroller Müller, 2012).

Magnitudes y unidades radiológicas

Los cambios químicos a nivel atómico y molecular producidos por la radiación ionizante son los acontecimientos fundamentales que conducen al daño por radiación en los tejidos. Para poder evaluar estos efectos, es esencial poder cuantificar dicha radiación, para lo cual recurrimos en este capítulo a la definición de los conceptos pertinentes. Durante la realización del primer Congreso Nacional de Radiología, realizado en Londres en 1925 se fundó la Comisión Internacional de Mediciones y Unidades de Radiación (ICRU, sigla en inglés), cuya función ha sido definir unidades y magnitudes de radiación. De manera conjunta con este organismo trabaja la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, sigla en inglés), creada durante el segundo Congreso Internacional de Radiología, en Estocolmo en 1928.

Dosis Absorbida, D

Es la magnitud física básica de dosis y se define como energía absorbida dE por unidad de masa dm . Es válida para cualquier tipo de radiación con o sin carga y para cualquier material

$$D = \frac{dE}{dm}$$

$$\text{Unidad: } \frac{J}{kg} = \text{Grey (Gy)}$$

Sin embargo, la dosis absorbida resulta insuficiente en términos de evaluar los efectos biológicos de una radiación incidente determinada, ya que no considera la distribución microscópica de la energía en un órgano particular. En referencia, y para los fines de la protección radiológica se ha definido la Dosis Equivalente en un órgano o tejido, H_T

Dosis Equivalente en un órgano o tejido, H_T

Se define como el producto de la dosis absorbida en el órgano o tejido D_T y el factor de ponderación de la radiación w_R

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

$$\text{Unidad: } \frac{J}{kg} = \text{Sievert (Sv)}$$

Para diferenciarla de la dosis absorbida, se nombra a la unidad con el nombre especial de Sievert (Sv). La suma se realiza para todos los tipos de radiación que estuviesen involucrados en la exposición. El factor w_R tiene en cuenta la probabilidad de las radiaciones de producir efectos estocásticos y depende del tipo y energía del campo de radiación incidente sobre la persona expuesta o del radioisótopo depositado internamente. En la tabla 1, se muestran los valores de w_R para distintos tipos de radiaciones.

Tabla 2.1. Factores de ponderación de la radiación*.

Tipo de radiación	w_R
Fotones de todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Protones y piones cargados	2
Partículas α , fragmentos de fisión, iones pesados	20

Nota. * Adaptada de ICRP 103

La exposición a la radiación de los diferentes órganos y tejidos corporales causa daños con distintas probabilidades y diferente gravedad. La combinación de probabilidad y gravedad recibe el nombre de “detrimento”. Para reflejar el detrimento combinado de efectos estocásticos debidos a las dosis equivalentes en todos los órganos y tejidos del cuerpo, se multiplica la dosis equivalente en cada órgano y tejido por un factor de ponderación del tejido, w_T , los cuales contemplan las variaciones en la sensibilidad a la radiación de los distintos órganos y tejidos para la inducción de esos efectos estocásticos. Al sumarse los resultados para todo el cuerpo, se obtiene la **dosis efectiva E** , la cual se define por medio de una doble sumatoria de los productos de la dosis absorbida en cada órgano $D_{T,R}$ por los correspondientes factores de ponderación.

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

$$\text{Unidad: } \frac{J}{kg} = Sv$$

$D_{T,R}$ indica la dosis absorbida en el órgano o tejido T debida a la radiación del tipo R .

Los valores de w_T se indican en la Tabla 2. Los mismos se han elegido de forma tal que una dosis equivalente uniforme en todo el cuerpo de lugar a una dosis efectiva numéricamente igual a dicha dosis uniforme. Así la suma de los factores de ponderación de los diferentes tejidos es igual a la unidad.

Tabla 2.2. Factores de ponderación de los tejidos.

Tejido	w_T	$\sum w_T$
Medula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos *	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivales, piel	0,01	0,04

Nota. * Resto de los Tejidos: Adrenales, región extratorácica (ET), vesícula corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix. Adaptada de ICRP 103

En resumen, en su interacción con el material biológico la radiación ionizante va depositando una cierta cantidad de energía y ello posteriormente puede traducirse en un efecto biológico, el cual dependerá no sólo de la dosis absorbida sino del tipo de radiación y de la radiosensibilidad de los tejidos u órganos expuestos. En este sentido se definen magnitudes dosimétricas, como la dosis equivalente y la dosis efectiva, que tienen en cuenta estas características. Estas magnitudes permiten estimar el riesgo asociado a la exposición a la radiación ionizante y son uno de los pilares fundamentales en donde se asientan las bases de la protección radiológica con la finalidad de proteger a los seres humanos y al medio ambiente de los posibles efectos nocivos de la radiación ionizante.

Referencias

- Figura 2.1. Pollock P. Senderos ondulados. Breve historia del arte. Susie Hodge. Ed. BLUME.
- Bernier J, Hall EJ, Giaccia A. (2014). Radiation Oncology: a Century of Achievements. Nature review. Cancer 4(9):737-47
- Busch U. (2016). Wilhelm Conrad Roentgen. El descubrimiento de los rayos x y la creación de una nueva profesión médica. Revista Argentina de Radiología. 80(4):298-307
- Autoridad Regulatoria Nuclear. (2001). Radioprotection in the medical applications of the ionizing radiations (INIS-AR-C--188). Argentina: Autoridad Regulatoria Nuclear - Cámara de Instituciones de Diagnóstico Médico.
- Hodge, S. (2017). Breve historia del arte. Blume.
- International Atomic Energy Agency. (2014). Diagnostic Radiology Physics, Non-serial Publications, IAEA, Vienna
- ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). (2011). Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. ICRU Report 85.

Khan FM. (2003). The Physics of Radiation Therapy. Chapter 3. Production of X-Rays. Lippincott Williams & Wilkins, third edition.

Figura 2.8: Museo Koller Müller (2012). Recuperado el 14 de diciembre de 2023. <https://kroller-muller.nl/en/vincent-van-gogh-still-life-with-meadow-flowers-and-roses>

United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR). (2008). Source and effects of ionizing radiation. New York: United Nations.