

## Radiaciones ionizantes

Fundamentos de radiactividad

Conceptos básicos de radioprotección

Ionización y penetrabilidad de las radiaciones en la materia

Efectos nocivos de la transferencia de energía

Dosimetría y efecto biológico

Manejo de Radioisótopos

Procedimientos para el uso de radionúclidos en el laboratorio

Apéndice A: Algunos emisores beta más conocidos

Apéndice B: Glosario

## FUNDAMENTOS DE RADIATIVIDAD

### INTRODUCCION:

El conocimiento del fenómeno de radiactividad surge inicialmente de los descubrimientos realizados por el físico francés Henri Becquerel (1852-1908). Becquerel, estudiando el fenómeno de fosforescencia en compuestos de Uranio, encontró que esta sustancia y otras afines demostraban una misma "actividad" espontánea, y que esta emisión producía una ionización en el aire de su alrededor, puesto de manifiesto por la velocidad de descarga de un electroscopio cargado, o por el grado de ennegrecimiento de una placa fotográfica. Becquerel encontró que la intensidad de la emisión de un compuesto de Uranio, era directamente proporcional a la fracción de peso del Uranio que había en el compuesto.

Muchas de estas observaciones, sin embargo, cayeron en el olvido, probablemente por el interés que despertó en esos años, el descubrimiento de los rayos X reportada por Roentgen. Fue entonces, a comienzo de 1898 cuando los esposos Curie comenzaron el estudio sistemático de un gran número de minerales y elementos y pronto hallaron que el elemento Torio (Th) y sus compuestos manifestaban la "actividad radiante" o "radiactividad" como posteriormente llamaron los Curie al fenómeno. Descubrir que el Torio era radiactivo tenía una gran importancia, pues hasta entonces se había pensado que el fenómeno era una propiedad exclusiva de un sólo elemento, el Uranio.

Básicamente las observaciones de los Curie llevaban a las mismas conclusiones a las que años antes había llegado Becquerel, pero los Curie fueron más adelante, estableciendo que la radiactividad es un proceso atómico que no es afectado por el estado físico ni por la combinación química de los átomos radiactivos con otros elementos. Esta observación indica que los procesos que llevan a una emisión radiactiva tienen lugar en el núcleo atómico y no en la esfera de electrones que lo rodean. La labor de los Curie como la de la mayor parte de los científicos fue dura, constante y desprovista de apoyo financiero. Sin embargo, en Julio de 1898 hicieron a la Academia de Ciencias Francesa, la siguiente declaración: "Realizando un conjunto de distintas operaciones, obtuvimos productos que eran cada vez más activos (por unidad de masa). Finalmente obtuvimos una sustancia cuya actividad es de unas 400 veces mayor que la del Uranio..." Creemos por tanto que la sustancia que hemos extraído de la pechblenda contenía un metal que hasta entonces no se había observado y cuyas propiedades eran las de Becquerel. Es importante hacer notar la actividad específica de la radiación como una característica propia y diferenciadora de cada elemento radiactivo.

Luego del anuncio de los Curie a la Academia de Ciencias de Francia, continuaron sus estudios en la búsqueda de nuevos elementos radiactivos para determinar de un modo más convincente sus propiedades específicas, especialmente sus pesos atómicos. A partir de esto se ha descubierto que todos los elementos que tienen  $Z > 80$  son radiactivos en cierto grado. En 1903, el premio Nóbel de Física se concedió conjuntamente a Becquerel y a los Curie por sus trabajos en el descubrimiento de la radiactividad. Como único reconocimiento María Curie fue galardonada también con el Nóbel de Química en 1911, por el descubrimiento de los elementos Polonio y Radio.

### Decaimiento Radiactivo

El decaimiento radiactivo es un proceso complejo en cual el núcleo de un átomo emite a lo menos una partícula y puede o no transformarse en otro elemento químico. Como ya lo mencionamos el decaimiento radiactivo tiene su origen en el núcleo atómico y está íntimamente relacionado con la estabilidad nuclear.

En el caso de que la partícula emitida sea una radiación gamma ( $\gamma$ ), la **radiación g** es un fotón de alta energía, el átomo sigue siendo el mismo. Si la radiación emitida es un neutrón, el proceso se denomina **emisión neutrónica**, las características químicas del átomo se conservan pero la masa atómica disminuye en una unidad, aquellos átomos que difieren en su masa pero no en su carga nuclear se denominan **isótopos**, existen isótopos estables e isótopos radioactivos. Si el núcleo emite una radiación alfa ( $\alpha$ ), la **partícula a** es un núcleo de helio, el átomo generador disminuirá su carga en dos unidades y su masa en cuatro; transformándose en otro elemento. En cambio si el núcleo generador emite una partícula  $\beta$ , la **partícula  $\beta$**  es un electrón, el átomo original se transforma en un elemento que tiene la misma masa, pero un número atómico mayor. En algunas ocasiones el núcleo incorpora electrones de las capas más cercanas de su envoltura, fenómeno conocido como **captura electrónica**, en este caso se emite un rayo X, una **radiación X** es un fotón de alta energía el cual tiene su origen en la esfera de electrones que rodea el núcleo, en este caso la radiación X tiene una energía que corresponde a la energía potencial del electrón capturado respecto de su núcleo; la captura electrónica es muy poco frecuente.

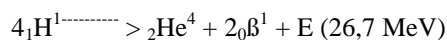
Los elementos radioactivos pueden emitir una o más de estas formas de radiaciones. Adicionalmente, algunos núcleos que resultan después de cada uno de estos decaimientos, pueden decaer aún más emitiendo generalmente una radiación  $\gamma$  u otra partícula. Estas radiaciones tienen en común que al interactuar con la materia le transfieren energía generando partículas iónicas, hecho por el cual también se les denomina radiaciones ionizantes.

Asociado a la estabilidad nuclear encontramos el fenómeno denominado **fisión nuclear**. La fisión nuclear es la ruptura completa de un núcleo, que genera dos núcleos más livianos con liberación de radiaciones y energía. Este proceso ocurre en forma espontánea en los elementos transuránicos, átomos de número másico mayores a 250, demasiado grandes para ser estables. Los núcleos con números másicos comprendidos entre 220 y 250 no experimentan fisión espontánea, pero esta puede llegar a inducirse bombardeando con neutrones lentos, neutrones rápidos y protones o partículas aceleradas. Por ejemplo cuando un neutrón, rápido o lento, golpea un núcleo de Uranio235, el resultado es un núcleo compuesto de Uranio236. La energía agregada por el neutrón vence la precaria estabilidad del núcleo y casi instantáneamente se aleja. La ruptura de un núcleo compuesto de Uranio236, habitualmente, da lugar a que dos quintas partes, aproximadamente, se desplacen en una dirección y las otras tres quintas partes, más o menos, en la dirección opuesta.

Además de los elementos radioactivos que encontramos en la naturaleza (**radioactividad natural**), casi cualquier elemento estable se puede convertir en uno radioactivo (**transmutación de elementos o radioactividad artificial**). La transmutación se logra al bombardear al elemento no radioactivo con partículas que tienen alta energía o como ocurre en los reactores atómicos bombardeando con neutrones; como es de suponer la finalidad del bombardeo es desestabilizar el núcleo. Esta técnica permite obtener trazadores radioactivos de una amplia variedad de elementos. Los trazadores tienen gran utilidad en aplicaciones industriales, médicas y de investigaciones básicas y aplicadas.

Otra fuente de radiaciones ionizantes y energía la encontramos en el proceso denominado **fusión nuclear**. La fusión nuclear consiste en la unión de núcleos ligeros para formar otros más pesados, en este reordenamiento de partículas nucleares se generan radiaciones ionizantes y energía. Este proceso requiere energías de activación mucho mayores que en el proceso de fisión. En este caso la energía de activación es la energía cinética necesaria para vencer las interacciones repulsivas entre los núcleos o partículas que colisionan; una vez formado el nuevo núcleo se libera una cantidad de energía mucho mayor que la energía cinética que tenían los núcleos antes de la fusión.

El sol es un reactor de fusión y las reacciones que se producen son principalmente aquellas en que están implicados los isótopos de hidrógeno, que es el elemento mayoritario en su composición. La reacción global, es la suma de una serie de reacciones que tiene lugar en la superficie solar a unas temperaturas del orden de 20 millones de grados Celsius, tiene la forma de



Parte de la radiación cósmica que recibe la Tierra proviene de estas reacciones, la que es atenuada en su paso por la atmósfera terrestre, actuando a modo de filtro. De la energía liberada, una fracción la percibimos en forma de luz, otra fracción es convertida en energía química por los organismos fotosintéticos, otra se degrada generando calor y una cuarta fracción se refleja. Energía química y calor son elementos fundamentales para sostener la vida tal como la conocemos en este planeta.

### Energía de Enlace en el Núcleo.

Para comprender el fenómeno de radiactividad se hace necesario que recordemos las razones por las cuales se produce la inestabilidad energética nuclear, que da origen a la emisión de radiaciones y energía. La masa de los núcleos atómicos está dada fundamentalmente por protones y neutrones, ambas partículas tienen aproximadamente la misma masa de 1 uma (unidad de masa atómica); esto explica por que todos los núcleos tienen masa que son casi múltiplos enteros de 1 uma. Sin embargo, al aumentar la precisión de las medidas espectrográficas de masa, se puso de manifiesto el carácter aproximado de esta ley de los números enteros. De hecho las masas de todos los núcleos son algo más pequeñas que la suma de las masas de los protones y neutrones libres que lo constituyen. Esta diferencia de masa para un núcleo determinado se llama su **defecto de masa**, y significa la masa que se "pierde" cuando las partículas constituyentes se reúnen para formar el núcleo. Por otro lado para que se obtenga un núcleo estable por la reunión de partículas nucleares individuales, el proceso debe ir acompañado de liberación de energía. Esta energía se llama **energía de enlace** del núcleo, pues es la energía potencial nuclear que debe cederse para que las partículas nucleares permanezcan ligadas.

Esta baja en la energía potencial estabiliza la interacción de las distintas partículas que conforman el núcleo. Por otra parte, si se comunica al núcleo la correspondiente energía de enlace, las partículas podrán disociarse de nuevo.

En términos cuantitativos se puede establecer una relación entre defecto de masa y energía de enlace nuclear, a través de la relación masa energía descrita por Einstein; de acuerdo con la ecuación:

$$E = mc^2$$

Donde E es la energía; m es la masa y c la velocidad de la luz. La ecuación indica que la masa puede transformarse en energía. Para la formación de núcleos a partir de los componentes libres (partículas nucleares) esta relación señala que la disminución de masa observada (defecto de masa) se transformó en energía liberada al reunirse las partículas nucleares (energía de enlace). De tal manera que, para un núcleo cualquiera  ${}_Z^A X$  en sus Z protones y (AZ) neutrones podremos escribir la siguiente relación:

$$\text{Energía de enlace (joules)} = \text{Defecto de masa (Kg)} \times c^2 \quad (\text{m}^2/\text{seg}^2)$$

La magnitud de esta energía nuclear, hizo necesario que en términos prácticos, se exprese en función de una nueva unidad llamada **electronvoltio (eV)**

### Fuerzas Nucleares y Decaimiento Radiactivo

Lo que hemos dicho acerca del defecto de masa y energía de enlace, no responde a interrogantes tales como: ¿Porqué las partículas nucleares se agrupan del modo que lo hacen?; ¿Cómo es que se encuentran confinadas en el núcleo cuyo diámetro promedio varía entre  $10^{13}$  y  $10^{12}$  cm. y no se escapan por efecto de la repulsión eléctrica entre los protones cargados positivamente?

Para responder a estas preguntas, debemos suponer la existencia de fuerzas atractivas, que no son de carácter eléctrico ni gravitatorio y que son peculiares de las partículas nucleares. Aunque estas **fuerzas nucleares** no están claramente definidas tienen a lo menos las siguientes características. Por un lado, son fuerzas de "corto alcance", esto es, decrecen rápidamente a cero, cuando la distancia entre ellas excede los  $10^{12}$  cm. (es decir tienen un radio de acción efectivo del orden del diámetro nuclear). Además, la fuerza nuclear entre un protón y un neutrón es aproximadamente la misma que entre dos neutrones o dos protones, sin embargo, en el caso de los protones, además de las fuerzas nucleares existe un componente de fuerzas eléctricas de repulsión dando una resultante que varía con la distancia entre protón protón.

La introducción de un nuevo término hará que nuestra discusión sea más concisa. Tanto los protones como los neutrones del núcleo, se denominan simplemente **nucleones**. Ahora bien, cuanto mayor es el número de nucleones de un núcleo, mayor será su energía de enlace. Pero no debemos esperar que el defecto de masa o la energía de enlace, varíe linealmente con el número de nucleones.

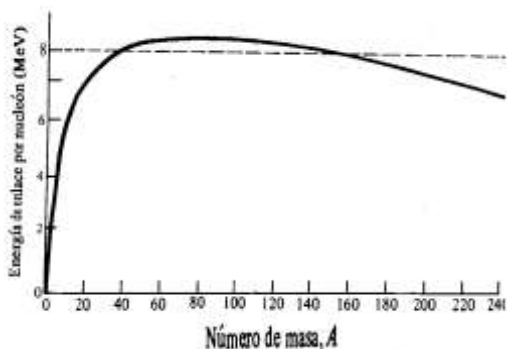


Figura 1: En esta figura se muestra la energía de enlace media por nucleón en función del número másico de los elementos.

Observemos en la figura 1, que la energía de enlace por nucleón, de los núcleos que tienen entre 50 y 90 nucleones es mayor que para el resto de la curva. Por lo tanto, los núcleos de aquellos elementos que se encuentran en la parte más elevada de la curva, son los más difíciles de descomponer o perturbar; son los más estables, en cierto

modo por que han liberado una mayor cantidad de energía por nucleón.



La curva de la fig. 1 también nos da información acerca de los procesos de **fisión** y **fusión** nucleares. Así los núcleos de la parte de la derecha y de la izquierda de la curva, por tener energías de enlace por nucleón más pequeñas, pueden transformarse en núcleos más estables de la parte central con liberación de energía. Se sigue entonces que los núcleos más masivos liberan energía cuando sufren la fisión, y los más ligeros, en la fusión nuclear.

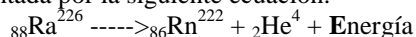
Dijimos que un núcleo inestable tiende a estabilizarse liberando energía en distintas formas; por emisión de partículas, captura de partículas, emisión de radiación electromagnética, y otros procesos. Este fenómeno de estabilización nuclear recibe el nombre de **decaimiento radiactivo**, el cual es un proceso independiente de la temperatura, presión, estado químico del elemento y de la presencia de otras especies químicas. Entre los procesos más importantes de decaimiento radiactivo distinguiremos con más detalle sólo cuatro tipos:

#### Decaimiento por Emisión de Partículas Alfa ( ${}_2\text{He}^4$ )

La partícula  $\alpha$  corresponde al núcleo del átomo de Helio (consistente en dos protones y dos neutrones), cargada positivamente y de dimensiones atómicas. Su naturaleza química fue estudiada inicialmente en 1903 por E. Rutherford quien detectó este tipo de radiación por la desviación que experimentaban estas partículas en presencia de un fuerte campo electromagnético.

Las partículas  $\alpha$  son emitidas generalmente por núcleos pesados ( $Z$  mayor de 80) como una forma de estabilizarse, evidentemente, esto implica que el núcleo se desprende de una cantidad importante de materia ya que  $Z =$  número atómico disminuye en 2 y  $A =$  número másico disminuye en 4.

Emisión representada por la siguiente ecuación.



Las partículas  $\alpha$  son emitidas con energías discretas (3 a 10 MeV) y viajan a cortas distancias, del orden de 27 cm. en el aire y 3040 mm en el agua.

#### Decaimiento por Emisión de Partículas Beta ( $\beta$ )

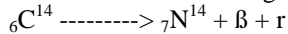
Las partículas  $\beta$  son electrones expulsados del núcleo a una velocidad cercana a la de la luz. Principalmente se distinguen dos tipos de emisión de partículas  $\beta$ :

##### a) Emisión de partículas $\beta$ negativas ( $\beta^-$ ):

Las partículas  $\beta$  negativas llamadas **negatrones** se originan por la conversión de un neutrón en protón con la expulsión simultánea de un electrón desde el núcleo, del estudio del espectro de energía de las partículas  $\beta$ , que va desde un nivel mínimo (0.1 a 0.3 MeV) a un máximo (1 a 2 MeV). Hay clara evidencia de que asociado a la emisión de la partícula  $\beta$  negativa, se emite otra partícula que no tiene carga ni masa en reposo, pero que posee un número cuántico de igual magnitud que el electrón, éste se ha llamado **antineutrino** ( $\bar{\nu}$ ). Emisión representada por la siguiente ecuación.

Neutrón  $\rightarrow$  Protón + Negatrón + Antineutrino

Como producto de la emisión  $\beta$ , el núcleo aumenta su número atómico ( $Z$ ) y el número másico permanece constante. Como se detalla en la siguiente ecuación.



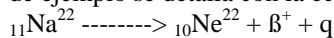
### b) Emisión de partículas $\beta$ positivas ( $\beta^+$ )



Este tipo de emisión ocurre cuando en el núcleo existe un "excedente" de protones, de manera que en un proceso de estabilización del núcleo un protón se convierte en un neutrón por la emisión de una partícula  $\beta$  cargada positivamente llamada **positrón**. De igual forma que la anterior existe una emisión simultánea de otra partícula del núcleo que recibe el nombre de **neutrino** ( $\nu$ ). Descrita por la ecuación siguiente:

Protón  $\rightarrow$  Neutrón +  $\beta^+$  +  $\nu$

En consecuencia el número atómico ( $Z$ ) disminuye y el número másico ( $A$ ) permanece constante. Que a modo de ejemplo se detalla con la ecuación para la emisión de  $\text{Na}^{22}$ .



En general las partículas  $\beta$  viajan en el aire a distancias mayores que las partículas alfa, del orden de metros, y obviamente tienen un poder de penetración mayor que las partículas  $\alpha$ .

### Decaimiento por Emisión de Rayos Gamma ( $\gamma$ ).

El físico francés P. Villard observó en 1900, que la emisión del Radio contenía una componente de gran poder penetrante, a la que dio el nombre de rayos  $\gamma$ . Esta radiación no se desviaba al pasar por campos intensos magnéticos o eléctricos, lo cual indicaba que se trataba de radiación de partículas no cargadas y además tenían asociado un campo electromagnético. La diferencia esencial entre la radiación  $\gamma$  y los rayos X radica fundamentalmente en su punto de origen. La radiación  $\gamma$  se origina por un reordenamiento electrónico que ocurre a nivel del núcleo, es de vida media muy breve ( $10^{12}$  s) y son radiaciones de longitud de onda más corta comparado con los rayos X. A su vez, los rayos X son radiaciones electromagnéticas de vida media más larga, originadas en los orbitales externos del átomo, producto de saltos energéticos de electrones excitados. Dado su carácter neutro desde un punto de vista eléctrico, y de no poseer masa asociada, la radiación  $\gamma$  que comúnmente acompaña a la estabilización nuclear de elementos pesados, no producen variaciones tanto en  $Z$  como en  $A$ . Sin embargo, la radiación  $\gamma$  es mucho más penetrante que las radiaciones  $\beta$  y  $\alpha$ , alcanzando distancias de varios metros en el aire.

### Decaimiento por Emisión Neutrónica

El neutrón es una partícula sin carga, de masa 1 una y es parte constitutiva del núcleo. La emisión neutrónica corresponde a la expulsión de un neutrón a alta velocidad desde el núcleo durante el proceso de fisión nuclear. El neutrón puede ser absorbido por otro núcleo y también es capaz de romper un núcleo produciendo una fisión adicional (proceso conocido como reacción en cadena).

Durante el proceso de fisión algunos neutrones emergen del núcleo en forma simultánea con la ruptura, los denominados "neutrones instantáneos"; otros denominados "neutrones retardados" son expulsados unos segundos más tarde. Producto de colisiones con otros núcleos los neutrones se enlentecen y son llamados "neutrones térmicos o lentos". La ausencia de carga eléctrica neta del neutrón le permite interactuar con núcleos sin la dificultad de barreras de energía eléctricas.

### DESINTEGRACION RADIATIVA.

Los distintos elementos radiactivos no solamente muestran gran diferencia en sus respectivas velocidades de desintegración, sino que cada átomo de un elemento dado se desintegra después de un intervalo de tiempo que es distinto para los átomos del mismo elemento. Sin embargo, para los átomos radiactivos de una clase determinada, la fracción del número total de átomos que se desintegrará por unidad de tiempo, es una magnitud característica, fija e inmutable, y que es independiente del estado fisicoquímico de la especie radiactiva. Este comportamiento tiene un carácter especial, ya que es posible definir una serie de relaciones matemáticas que nos permiten cuantificar ciertos parámetros que nos ayudarán a comprender el proceso del decaimiento radiactivo.

Si tenemos una especie radiactiva que decae en el tiempo, podemos encontrar una tasa o rapidez de decaimiento

para un número inicial de núcleos radiactivos:

$$\text{Ec.1. } dN/dt = l N$$

Donde:

$N$  = número de núcleos radiactivos en un tiempo " $t$ "

$t$  = tiempo

$l$  = constante de desintegración

$dN/dt$  = actividad

Esta expresión, nos dice que la rapidez de decaimiento radiactivo, es proporcional al número de

núcleos presentes en un tiempo determinado. Haciendo un reordenamiento de variables e integrando:

$$\text{Ec.2 } \delta \ln N = -\lambda dt$$

La solución de la integral nos da:

$$\text{Ec.3 } \ln N - \ln N_0 = -\lambda (t - t_0) \text{ Si para } t_0 = 0 \text{ (número inicial de núcleos radiactivos) es distinto de cero.}$$

$$\text{Ec.4 } \ln N = -\lambda t + \ln N_0 \text{ o } \ln N/N_0 = -\lambda t$$

Si graficamos la Ec.4 colocando en la ordenada  $\ln N$  y en la abscisa el tiempo, encontraremos que la gráfica es una recta con pendiente negativa cuyo significado físico equivale al valor de la **constante de desintegración (1/s)**, este es un valor característico de cada especie radiactiva.

Otro parámetro importante en la cuantificación del comportamiento de una especie radiactiva es conocer su **vida media**, que se define como el tiempo necesario para que la actividad de un número de núcleos radiactivos disminuya a la mitad. Si en la Ec.4 reemplazamos  $t = t^*$  y  $N = N_0/2$  tenemos:

$$\text{Ec.5 } \ln N_0/2 = -\lambda t^* + \ln N_0$$

$$\ln N_0/2 - \ln N_0 = -\lambda t^*$$

$$\ln 1/2 = -\lambda t^* \text{ de donde: } t^* = \ln 2/\lambda = 0.693/\lambda$$

Este período de semidesintegración o vida media es una magnitud, independiente de la cantidad inicial de núcleos radiactivos presentes. Si tomamos la forma antilogarítmica de la Ec.4 tenemos:

$$N(t) = N_0 * e^{-\lambda t}$$

Esta ecuación exponencial da cuenta del número de núcleos radiactivos presentes en función del tiempo, de una especie radiactiva cualquiera. De igual forma a muchos fenómenos físicos, que ocurren en la naturaleza, la ley de desintegración radiactiva tal como se expresa en la ecuación exponencial anterior, es una ley estadística y es aplicable a un gran número de átomos radiactivos, no implicando hipótesis especiales de por qué los átomos se desintegran. Es decir que si pudiésemos individualizar un átomo, esta ecuación no nos permite predecir cuando ese átomo en particular emitirá su radiación, puesto que desconocemos los mecanismos subyacentes del fenómeno, sólo podremos estimar la probabilidad de desintegración para ese átomo, ya que la ecuación describe la fenomenología (o comportamiento) de un gran número de átomos y sólo nos dice que al cabo de una vida media habrán irradiado en forma espontánea el 50 % de los átomos inicialmente presentes pero no cuales de ellos. Luego al cabo de otra vida media habrá decaído el 50 % de los átomos que quedaban y así sucesivamente, por cada vida media que transcurra habrá emitido el 50% de los átomos radioactivos inicialmente presentes. La validez estadística de este comportamiento hace de él una herramienta muy útil para determinar riesgos, corregir cálculos o estimar fechas de muestras arqueológicas entre otras aplicaciones.

## UNIDADES Y MEDICION DE LA RADIATIVIDAD

### Unidades de energía:

En Física la unidad genérica de energía es el joule, tal como se ha definido en el Capítulo de Mecánica, las energías atómica y nuclear generalmente se expresan en términos de

**electronvolt (eV)**. El eV está definido como la energía cinética adquirida por un electrón que es acelerado a través de una diferencia de potencial de un voltio. Las unidades de energía comúnmente utilizadas en los procesos de desintegración radiactiva son múltiplos de eV. Así, energías de miles de electronvoltios se denominan kiloelectronvoltios (keV) y millones de electronvolt, se denominan megaelectronvoltios (MeV).

$$1 \text{ MeV} = 1.602 * 10^{13} \text{ joules (J)}$$

### Unidades de Actividad:

La medición de la actividad de una muestra radiactiva se refiere al número de núcleos radiactivos que decae en la unidad de tiempo. Desde 1950 el Sistema Internacional ha adoptado la unidad de **Curie (Ci)** como medida patrón de medición de actividad de una muestra radiactiva. El curie está definido como el número de desintegraciones por segundo de 1 gr. de  $\text{Ra}^{226}$ .

$$1 \text{ Ci} = 3.7 * 10^{10} \text{ dps o } 2.22 * 10^{12} \text{ dpm}$$

En 1985 la unidad internacional de medida de actividad ha sido reemplazada por **el Becquerel (Bq)** que es equivalente a 1 dps, de tal forma que ambas unidades que actualmente están vigentes se relacionan de la siguiente manera:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 * 10^{10} \text{ dps} = 3.7 * 10^{10} \text{ Bq}$$

Muchas veces en el trabajo de Laboratorio con radioisótopos generalmente se mezclan isótopos estables e isótopos radioactivos, lo que hace necesario expresar la medición de radiactividad por gramo de un compuesto, elemento o masa de un núcleo radiactivo, este nuevo concepto se denomina **actividad específica**, por ejemplo: Ci/ugr, mCi/mmol, etc.

### Unidades de Exposición:

La emisión de una fuente radiactiva provoca diversos efectos en el ambiente que la rodea. La unidad internacional de exposición es el **Roentgen (R)**, y se refiere específicamente a la cantidad de carga producida en el aire por emisión de rayos X o radiación  $\gamma$ . Numéricamente el Roentgen está definido como:

$$1 \text{ R} = 2.58 * 10^4 \text{ C/kg}$$

La exposición de un Roentgen corresponde a la producción de cerca de  $2 * 10^9$  pares iónicos por centímetro cúbico de aire seco a presión y temperatura normal. Habitualmente se maneja el concepto de tasa de exposición de una fuente radiactiva, que corresponde simplemente a unidades de exposición en función del tiempo, a decir, roentgen/hora,

miliroentgen/min. etc. Cabe hacer notar que el concepto de la unidad Roentgen de exposición es aplicable solo a radiaciones de rayos X y  $\gamma$  en el aire.

### **Medición de la Radiactividad**

El tipo de radiación determina el tipo de instrumento a utilizar, ningún instrumento puede monitorear y discriminar entre todos los tipos de radiaciones y los variados niveles de energía.

Cuando se escoge un instrumento es importante saber como trabaja para evaluar sus capacidades y limitaciones.

El propósito de estos apuntes está dirigido a una discusión de los principios básicos de detección de la radiactividad y escapan a la idea de dar una información técnica detallada del instrumental. En forma muy general existen dos tipos de metodología para detectar y cuantificar la radiactividad:

a) Aquellos basados en la **ionización de gases**.

b) Aquellos basados en la **excitación de líquidos o sólidos**.

Cuando una partícula de alta energía cargada pasa a través de un gas, su campo eléctrico saca a los electrones de su orbital de aquellos átomos del gas suficientemente próximos a la ruta de la partícula, causando ionización. La habilidad para producir ionización decrece en el orden:  $\alpha > \beta > \gamma$  en una relación de 10.000 : 100 : 1. En la práctica por ionización sólo se pueden detectar partículas  $\alpha$  y  $\beta$ . De los métodos de ionización para la detección de radioactividad, el contador Geiger Mueller (GM) es un instrumento frecuentemente usado en muchos laboratorios para el monitoreo de radiación ambiental. El GM detecta básicamente, radiación ionizante  $\alpha$  y  $\beta$ . El instrumento consiste de un cilindro cerrado lleno de un gas (mezcla de Ar e isobutano) y en la parte central del tubo se ubica un electrodo (ánodo) que está a 1000 voltios positivo respecto a la envoltura del cilindro (cátodo). Cuando una radiación incidente penetra en la cámara donde está el gas se produce un efecto de ionización con la consecuente formación de pares iónicos, los electrones producidos se mueven hacia el ánodo debido al campo eléctrico generado. El campo acelera a estos electrones, los cuales por su gran velocidad son capaces de ionizar más moléculas del gas. De aquí resulta un efecto multiplicador de electrones en la vecindad del ánodo, lo que origina una corriente de electrones la cual puede ser convenientemente registrada. El GM tiene un período de tiempo en que es refractario a la generación de flujo de corriente (200300 m seg.), este período se llama "tiempo muerto", debe tenerse presente el tiempo muerto cuando se trate de detectar radiaciones de gran intensidad.

La metodología de excitación, un poco más sofisticada, se refiere a la espectrometría de centelleo líquido o sólido. De entre estas el Contador de centelleo líquido (CCL), es el instrumento más utilizado. La base del método es la transducción de la colisión de una radiación incidente en una señal luminosa. Esta señal luminosa puede ser detectada y transformada en un pulso de corriente mediante un sistema electrónico de registro. El procedimiento consiste en que la muestra radiactiva es disuelta o suspendida en un sistema centellador compuesto por un solvente orgánico (Tolueno), un fluoróforo primario (PPO) y un fluoróforo secundario (POPOP). Como resultado de la interacción entre la radiación y el solvente orgánico existe una discreta cantidad de energía transferida, la cual puede ser transferida a otras moléculas del solvente o ser emitida como luz; este último fenómeno es conocido como fosforescencia. La emisión de la señal luminosa del solvente tiene una longitud de onda muy corta, además de ser muy rápida en el tiempo, la cual no puede ser detectada. Entonces esencialmente la función que realizan los fluoróforos, tanto primario como secundario, es amplificar esta señal luminosa en términos de hacerla de una longitud de onda mucho más larga la cual pueda ser detectada por un tubo foto multiplicador de alta resolución. Este tubo responde a pulsos de luz y la traduce en una señal eléctrica que puede ser registrada y analizada.

Las ventajas del contador de centelleo líquido respecto del contador GM, son su alta resolución, capacidad de detección de una amplia gama de radiaciones, así como también, el poder discriminador entre radiaciones de alta y baja energía. Ninguna de estas técnicas mide directamente el número de radiaciones emitidas por alguna especie radiactiva, si no que cuantifica y amplifica el resultado de las colisiones de partículas emitidas por un núcleo radiactivo con algún componente del sistema de ensayo, por lo cual es necesario corregir la información obtenida por lo que se ha denominado la eficiencia de un contador.

$$\% \text{Eficiencia} = \text{cpm/dpm} \times 100$$

### **CONCEPTOS BASICOS EN RADIOPROTECCION**

#### **INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA**

Excepto cuando la desintegración radiactiva sucede en el vacío la radiación emitida, radialmente en todas direcciones, atraviesa la sustancia que la envuelve. Se han descrito dos formas principales de interacción: excitación e ionización. **Excitación:** Implica la transferencia de parte de la energía de la radiación a electrones orbitales de un átomo dejándolo en estado excitado. La vuelta del electrón excitado a su orbital de origen puede dar lugar a la emisión de rayos X. La colisión de una partícula con un núcleo atómico puede desestabilizar el núcleo y dar lugar a radiaciones ionizantes y/o fisiones. **ionización:** Es la transferencia de energía que trae como consecuencia la remoción de un electrón orbital, dejando al átomo en un estado ionizado (par iónico). Este mecanismo, involucra cambios en la estructura química de la materia que está siendo irradiada. Mencionaremos en forma sucinta la interacción de las radiaciones clásicas con la materia:

**Radiación alfa:** Son partículas cargadas positivamente, con energía del orden de 310 MeV. El grado de interacción con la materia debido a su alta densidad de carga y masa es relativamente mayor que el de otras partículas. Este tipo de

radiación es altamente ionizante. Debido a su alto campo electromagnético asociado para ionizar las moléculas del medio no requieren de una colisión, en el sentido de choque de partículas, basta que pasen en las proximidades para desalojar electrones de los átomos cercanos a su trayectoria.

Su poder de penetración es relativamente bajo, recorren distancias cortas a través de la materia, a modo de ejemplo: las partículas  $\alpha$  de 7.7 MeV del Bismuto recorren un máximo de 7 cm. en el aire, estos 7 cm. son el espesor o espacio requerido para que la partícula pierda el exceso de energía cinética respecto de las moléculas del medio.

La intensidad con que la partícula  $\alpha$  cede su energía, hace que esta partícula produzca un gran daño en su camino y puedan ser neutralizadas con relativa facilidad. Una partícula  $\alpha$  no se detiene después de una colisión con un átomo, las mediciones demuestran que en promedio se pierden 35 eV por cada átomo que se ioniza en el aire. De aquí que una partícula  $\alpha$  de 7,7 MeV creara en su camino alrededor de 200.000 iones antes de llegar al reposo, este efecto de ionización secundaria es el efecto relevante respecto de la ionización que produciría en el ambiente la sola presencia de la partícula  $\alpha$  (ionización primaria). Es evidente que detener partículas  $\alpha$  es fácil; la mayor parte de las radiaciones  $\alpha$  son detenidas por el grosor de una hoja de papel.

**Radiación Beta:** Es la emisión de negatrones o positrones a alta velocidad desde el núcleo, en algunos casos con velocidades cercanas a la de la luz, por lo tanto el tiempo de interacción con otras cargas es menor. El efecto de ionización de las partículas  $\beta$  es mucho menor que las partículas  $\alpha$  de igual energía. La menor intensidad con que ceden su energía las partículas  $\beta$  respecto de las partículas  $\alpha$  se debe a la diferencia en las densidades de carga y masa entre ambas partículas. Los emisores  $\beta$  en promedio tienen un alcance de 4 m/MeV en el aire. Pero las partículas  $\beta$  de alta energía tienen un alcance adicional de 2 a 3 m en el aire por cada MeV sobre 0,5 MeV. Las partículas  $\beta$  de energías mayores a 0,07 MeV son capaces de penetrar la capa nominal de células protectoras de la piel humana ( $7 \text{ mg/cm}^2$  o una distancia de 0,07 mm).

Las partículas  $\beta$  de alta energía en su recorrido exhiben un alto poder de excitación. La desaceleración de partículas  $\beta$  que pasan en las inmediaciones del campo electromagnético nuclear va acompañada de la producción de radiación electromagnética (rayos X); este fenómeno es conocido como efecto bremsstrahlung. En el **efecto bremsstrahlung**, la producción de rayos X ocurre principalmente cuando la partícula  $\beta$  de alta energía atraviesa sustancias formadas por átomos de alto peso molecular, cuando atraviesa sustancias de bajo peso molecular la partícula  $\beta$  también se desacelera pero no ocurre la emisión de radiaciones X.

**Radiación Gamma y rayos X:** La energía de los fotones de las radiaciones  $\gamma$  son del orden de los MeV y la de los rayos X en promedio un orden menores (0,1 MeV). Fundamentalmente son radiaciones electromagnéticas, que no poseen carga ni poseen masa en reposo, por lo tanto el efecto ionizante asociado a ellas proviene principalmente de reacciones de ionización secundarias. El mecanismo de interacción con la materia se puede explicar en términos de colisiones en el sentido clásico (intercambio de momentum y energía). Existen tres mecanismos por los cuales la radiación  $\gamma$  pierde energía, que es dependiente del medio por el cual esta se propaga:

- a) Efecto fotoeléctrico
- b) Efecto Compton
- c) Producción de pares iónicos

Por su naturaleza el poder de penetración de este tipo de radiación es obviamente de mayor alcance comparado con las radiaciones  $\alpha$  y  $\beta$ , por tal motivo, otra serie de precauciones adicionales tendrán que tenerse en cuenta para neutralizar su efecto biológico. Básicamente aumentando la densidad y espesor del recipiente que los contiene.

**Emisión de Neutrones:** Un neutrón, espontáneamente emitido por núcleos pesados, es libre de viajar una gran distancia y principalmente frenado por colisión directa con los núcleos de la materia; un neutrón puede penetrar más de un metro en el hormigón. Producto de la colisión con los núcleos el neutrón se desacelera (neutrón térmico). El neutrón interacciona desestabilizando el núcleo blanco y como consecuencia de esto generando nuevas radiaciones. Puesto que en ciertos núcleos la presencia de neutrones lentos genera fisiones, cabe hacer notar en este caso que la desestabilización del núcleo no proviene de la energía cinética extra que aporte el neutrón al núcleo, si no que de la perturbación de la estructura nuclear por la presencia de un neutrón adicional.

## IONIZACION Y PENETRABILIDAD DE LAS RADIACIONES EN LA MATERIA

En la sección anterior hemos discutido parámetros como carga, masa y energía en relación con el grado de ionización y penetrabilidad de las distintas radiaciones en la materia, en base a los modos principales de interacción entre ambas. Hemos dicho que las partículas ionizantes penetran en la materia mientras tengan un exceso de energía cinética respecto de las moléculas del medio que atraviesan y esta claro que las radiaciones disipan el exceso de energía ionizando y excitando las moléculas próximas a su trayectoria. Las consecuencias sobre la sustancia blanco dependen de su estructura, del tipo de radiación y del mecanismo principal de interacción.

Podemos decir que el grado de interacción, de las radiaciones con la materia, depende de la velocidad con que la radiación cede su energía en su paso por la materia. La velocidad de intercambio de energía en el desplazamiento lineal de las radiaciones se ha denominado **TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGIA (LET)** (Lineal Energy Transfer). Este nuevo concepto, LET, por estar referido a un parámetro básico y general (la energía) de la interacción radiación materia, hace abstracción de los mecanismos moleculares del traspaso de energía.

Plantear la interacción en términos de Transferencia Lineal de Energía permite, con cierta confianza, comparar el efecto de distintas radiaciones sobre una misma sustancia o una radiación sobre distintas sustancias. Las radiaciones con una LET alta, presentan bajas penetrabilidad y una intensa ionización y/o excitación; aquellas radiaciones de LET bajo tienen una penetrabilidad mayor e intensidad de ionización baja. En una comparación relativa las radiaciones  $\alpha$  y  $\beta$  tienen LET altos en cambio las radiaciones  $\gamma$  y los neutrones presentan LET bajos. La transferencia lineal de energía depende por una parte de la densidad de carga, densidad de masa y momentum de la radiación y por otro de la densidad de masa, densidad electrónica y peso molecular de los átomos de la materia. Las consecuencias de la radiación no solo dependen del LET sino que también de parámetros como la energía máxima e intensidad de la radiación, desde el punto de vista de esta sección podemos concluir que:

- a) El **grado de ionización de una sustancia** por una determinada radiación depende de la energía de la radiación, de su intensidad y de la transferencia lineal de energía.
- b) La **penetrabilidad de las radiaciones** son inversamente proporcionales al LET y directamente proporcionales a la energía de la radiación. En otras palabras, los efectos de la radiación dependen fundamentalmente de la cantidad de energía que liberen en una cantidad de materia: a más energía liberada más alteración de la materia. (para los humanos la alteración podrá ser beneficiosa por ejemplo esterilización de instrumental médico o dañina como la alteración de tejidos corporales propios).

### EFFECTOS NOCIVOS DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA

La acción de la irradiación se traduce en un aumento de radicales libres. Los radicales libres son generados por la ionización y ruptura de enlaces moleculares de la materia irradiada. A este daño directo de la radiación debe adicionarse la modificación de estructuras debido a las reacciones de oxidación reducciones de los radicales libres con las moléculas de su entorno.

La exposición de la materia inanimada a la radiación lleva a la degradación y formación de nuevos compuestos, ya que no considera procesos activos de eliminación y reposición de estructuras dañadas. En los seres vivos normalmente se produce una cierta cantidad de radicales libres, asociados a procesos de oxidoreducción generados por su propio metabolismo, de modo que en condiciones fisiológicas están compensados: la producción de radicales libres, la eliminación o bloqueo de estos y la reparación del daño que ellos pudieren causar.

Para neutralizar radicales libres los organismos vivos utilizan un proceso enzimático que considera primero la acción de la **superóxido dismutasa**, enzima que cataliza la conversión del anión superóxido  $O_2^-$  a peróxido de hidrógeno y agua; seguido de la acción de la **catalasa**, enzima que acelera el paso del peróxido de hidrógeno a agua y oxígeno molecular.

Un segundo mecanismo lo constituyen sustancias que aceptan fácilmente electrones y pueden ejecutar una función de apoyo eliminando radicales libres. Estas sustancias son **ácido ascórbico, glutatión y vitamina E**. Una vez producida la modificación de estructuras por la radiación o radicales libres, existen dos mecanismos celulares para la eliminación de moléculas dañadas, no específicos del daño producido por radicales libres pero importantes de tener en cuenta. Durante la vida celular la gran mayoría de los componentes celulares son reemplazados en forma periódica, estos ciclos normales de eliminación y reposición de moléculas en la célula viva, se denomina **recambio de los componentes celulares** y tiene un tiempo característico para cada componente. El otro lo constituye un sistema de vigilancia de la correcta estructura de proteínas, la **detección de anomalías** en estas induce su degradación en forma acelerada. Para moléculas de gran estabilidad como el DNA, que no recambian, existen procesos de reparación altamente eficientes, pero no perfectos. Los mecanismos mencionados en el párrafo anterior, entre otros, hacen posible la vida a dosis bajas de radiaciones, sin efectos nocivos de estas. A modo de ejemplo supongamos el caso hipotético en que un aumento de radicales libres en la célula pueda sobrepasar la acción de los mecanismos antioxidantes. Esta situación aumenta la probabilidad de daño celular.

Tejidos con baja actividad antioxidante, como el ojo, son más sensibles al daño por radiaciones ionizantes y propensos a la formación de cataratas. El daño puede ser inmediato en el caso de altas dosis o diferido por alteración de estructuras importantes que no puedan ser reemplazadas o reparadas. Supongamos la alteración de una proteína por radiación o radicales libres producidos a su paso. Los mecanismos celulares de vigilancia detectarían la proteína alterada y esta será eliminada. La disminución de la concentración de esta proteína particular, activaría la maquinaria de traducción y/o transcripción con el fin de restablecer la función alterada (mantener la homeostasis celular). Supongamos ahora que la radiación o el radical libre interacciona de forma que la modificación de la proteína es tan sutil que el sistema de vigilancia celular no discrimina entre la estructura normal y la alterada, la proteína ahora, cumple su función pero genera metabolitos o señales en forma no fisiológica, esta situación imaginaria, puede llevar a un estado de desequilibrio metabólico transitorio dependiendo de la estabilidad (velocidad de recambio) e importancia de la proteína en particular y de la activación de mecanismos de compensación celulares específicos para esa anomalía.

Supongamos ahora que una molécula puede encontrarse en dos situaciones: **i)** altamente enrollada por un conjunto de proteínas que la plisan y envuelven o **ii)** desenrollada y sin la envoltura de proteínas que la rodee. La probabilidad de daño por radiación o radicales libres es la misma en ambas situaciones? Obviamente No, La probabilidad de daño es menor en el primer caso, puesto que la molécula enrollada tiene una menor superficie de exposición a la radiación y a los radicales libres, además el acceso a la molécula está restringido por la cubierta de proteínas que la enrollan. Este ejemplo es una clara alusión a las dos formas extremas en que podemos encontrar el DNA. El DNA de células en estado proliferativo se encuentra gran parte del tiempo desenrollado en cambio el DNA en células en estado no prolife-

rativo, se encuentra la mayor parte del tiempo enrollado. De allí, a pesar de la existencia de sistemas muy eficientes de reparación, las probabilidades de daño genético sean mayores en tejidos de alta actividad proliferativa: Médula ósea, epitelios, gónadas. Podemos concluir que no todas las estructuras celulares están expuestas al mismo daño. El riesgo de daño biológico para una misma estructura varía de acuerdo al tejido, el estado fisiológico y obviamente de la energía, intensidad, duración y LET de la radiación.

A diferencia de la materia inanimada, dentro de ciertos rangos, la presencia de mecanismos de bloqueo y eliminación de radicales libres junto a la capacidad de regeneración y recambio de estructuras celulares eliminan o minimizan los riesgos de daño producidos por radiaciones a bajas dosis.

## **DOSIMETRIA Y EFECTO BIOLÓGICO:**

### **Dosis Absorbida:**

Como hemos mencionado anteriormente, un núcleo radiactivo puede emitir uno o más tipos distintos de radiación, dependiendo del modo de decaimiento que se trate. Desde un punto de vista físico, la dosis radiactiva se define como la cantidad de energía por unidad de masa, depositada en cualquier medio por cualquier tipo de radiación ionizante. La unidad original de dosis absorbida es el **rad**, que corresponde a:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/gr} = 0.01 \text{ J/Kg}$$

En 1985 esta unidad fue reemplazada por el **Gray (Gy)**, que es equivalente a una dosis de 100 rads depositada sobre una masa de 1 gramo del material que absorbe.

$$1 \text{ Gray} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/Kg}$$

Naturalmente, estas dosis radiactivas dependen de al menos los siguientes factores a considerar:

- a) Intensidad de radiación
- b) Energía de cada radiación
- c) Tiempo de exposición
- d) Tipo de tejido expuesto
- e) LET

### **Dosis Equivalente:**

Desde el punto de vista biológico, el concepto de dosis absorbida no es suficiente para explicar el efecto biológico específico que producen las diversas radiaciones en el organismo, la cual no es necesariamente la misma para los distintos tipos de radiación. Para obviar estas diferencias se ha establecido el concepto de **dosis equivalente** que es una medida de dosimetría biológica. La unidad internacional es el **rem** (rad equivalente man). Operacionalmente esta unidad de dosis equivalente que cuantifica el daño biológico producido por radiaciones se define como:

$$1 \text{ rem} = \text{dosis absorbida (rads)} \times \text{eficacia biológica relativa (EBR)}$$

Como se mencionara, una misma cantidad de energía puede producir distintos efectos a nivel biológico. Para uniformar criterios a este respecto es que internacionalmente se ha tomado un nivel de radiación patrón ( rayos X de 250 keV de energía), y sobre este nivel de referencia para el efecto biológico, se define la **Eficacia Biológica Relativa (EBR)**, como la razón entre el efecto biológico debido a una radiación experimental respecto del efecto biológico de referencia, para un órgano o tejido en particular.

La nueva unidad de dosis equivalente aceptada internacionalmente es el **Sievert (Sv)**:

$$1 \text{ Sievert (Sv)} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ J/Kg}$$

Inevitablemente, una de las mayores fuentes de radiación ionizante a la que está expuesta la población mundial es la radiación natural ambiental, uno de cuyos componentes, es la radiación ultravioleta (0,064 rem/año) proveniente de la luz solar, además de la presente en elementos naturales (transuránicos; potasio 40) de la corteza terrestre (0,040 rem/año) y de la atmósfera terrestre, en conjunto el nivel basal alcanza a alrededor de 0.1 a 0.2 rem por año. Este nivel varía dependiendo de la altitud, localización geográfica y calidad de vida de la población. Esta radiación natural es inevitable, los radiobiólogos consideran que hemos aprendido a vivir con ella. Esto significa que sea cual sea su daño, nos permite vivir sin observar efectos nocivos. Como consecuencia, la radiación natural se toma como punto de partida para el establecimiento de las normas referidas a la radiación artificial. Sin embargo, es generalmente aceptado por la comunidad científica internacional, que la exposición a la radiación ionizante produce efectos dañinos al ser humano. Estos efectos son generalmente clasificados en tres categorías:

1. **Efectos Somáticos:** Son los que ocurren en el organismo expuesto a la radiación ionizante que dependiendo de una serie de factores tales como tiempo de exposición, nivel de energía y otros, se pueden distinguir en:

efectos precoces: es decir, hay signos evidentes después de una exposición aguda (100 rem más después de algunas horas).

efectos tardíos: son aquellos efectos observables después de muchos años transcurrida la exposición, tales como el cáncer.

2. **Efectos Genéticos:** Anormalidades que pueden ocurrir en futuros niños de individuos expuestos y en subsecuentes generaciones.

### 3. Efectos Teratogénicos Efectos observables en niños expuestos a radiación durante su vida fetal y/o desarrollo embrionario.

Sin duda los efectos biológicos de la radiación están relacionados estrechamente con la dosis expresada en rem:

0 25 rem: No se observan efectos inmediatos, parecen no tener consecuencias importantes.

25 100 rem: Se observan algunas alteraciones especialmente en la sangre, hay evidente compromiso de otras funciones del organismo, pero son recuperables.

100 300 rem: Ya hay alteraciones más evidentes, vómitos, caída del pelo, hemorragias, cuya recuperación es parcial.

200 600 rem: Las probabilidades de morir aumentan, por afecciones a la médula ósea, síndrome gastrointestinal y lesiones al Sistema nervioso.

Los efectos pueden depender también de otros factores, como la presencia de radiosensibilizadores (O<sub>2</sub>) o radioprotectores discutidos anteriormente. La gran eficacia destructora de pequeñas energías de radiación proviene de su acción directa o indirecta sobre partes importantes de la célula (ácidos nucleicos, enzimas, mitocondrias, membranas internas.), dada la fuerte localización de los paquetes de energía. Si dicha energía se suministrara en forma deslocalizada, en forma de calor, por ejemplo, los efectos serían imperceptibles.

### MANEJO DE RADIOISOTOPOS

Las recomendaciones fundamentales de la **Comisión Internacional para la Protección Radiológica (ICRP)**, establecen las dosis máximas permisibles para aquellos que estén expuestos profesionalmente a la radiación y dosis límite para el público en general. Ya que los trabajadores bajo radiación son conscientes del peligro posible y esperan ser vigilados adecuadamente, se permite una mayor exposición; para asignar un margen las dosis límite para el público en general, se establecen en diez veces menos que las dosis máximas permisibles para la exposición profesional. La ICRP identifica los órganos genitales, los ojos y la médula ósea de los huesos como las partes más sensibles del cuerpo humano. Para estos órganos la dosis máxima permisible se sitúa en 5 rem/año y el límite de dosis para el público, en 0,5 rem/año. Las dosis máximas permisibles para la piel, los huesos y el tiroides son de 30 rem, y los límites de dosis 3 rem por año. Manos y antebrazo 75 y 7,5, y otros órganos 15 y 1,5 rem por año. Para el cuerpo global la dosis máxima permisible es de 5 rem por año para los trabajadores y el límite de dosis para el público, 0,5 rem por año. Mujeres profesionales en edad fértil tienen un límite de 3 rem por año. Empleados menores de 18 años no deben exponerse por sobre los 0,5 rem por año.

Mujeres empleadas embarazadas no deben exponerse a la radiación en los primeros tres meses de embarazo, posteriormente las dosis permitidas son de 0,5 rem al año, con dosis no superiores a los 0,01 rem por semana. Se entiende que un trabajador no puede recibir toda la dosis permitida en una pequeña fracción del año.

**La radiación no es detectada por nuestros sentidos y sus efectos son acumulativos y generalmente diferidos en el tiempo.** Para el profesional es de suma importancia minimizar y controlar su exposición. Es también responsabilidad del profesional minimizar el riesgo de los usuarios de radiaciones y radioisótopos y de la población en general. Se requiere un manejo adecuado de radioisótopos, sus desechos y una visión clara del impacto que tendrán estos en el medio ambiente y el grupo crítico de población en riesgo. Actualmente las aplicaciones médicas de la radiación suponen, con mucho, la parte más importante de la exposición del público a la radiación artificial. Los rayos X médicos y dentales y las diversas formas de radioterapia son instancias en las que un beneficio bien definido para el individuo expuesto se contrapone a la posibilidad, estadística y variable, aunque pequeña, de daño por la radiación. El uso de radioisótopos y radiaciones ionizantes (rayos X) en el laboratorio de investigación y en la clínica, requiere de precauciones especiales contra los riesgos de la radiación.

**TABLA 1 ALGUNOS EMISORES BETA MAS CONOCIDOS**

PARAMETROS	H <sup>3</sup>	C <sup>14</sup>	Ca <sup>45</sup>	P <sub>32</sub>	Sr <sup>90</sup>
Vida media	12.28 a.	5739 a.	162.7 d.	14.29 d.	28.6 a.
Energía Máxima (MeV)	0.019	0.154	0.257	1.71	2.28
Rango en el aire (cm.)	0.6	23	46	610	853
Rango en el agua (cm.)	0.00006	0.029	0.06	0.8	1.10
Fracción* a través de la piel		0.11	0.37	0.95	0.97
Dosis# (mrad/h)		2.6	5.9	4.3	3.9



\*Fracción que provoca la muerte de una capa de piel de una densidad de  $7 \text{ mg/cm}^2$ .

#Velocidad de dosis de  $\text{InCi/cm}^2$  depositada sobre la superficie de la piel

## GLOSARIO



**ABSORCION:** es el fenómeno por el cual la radiactividad transfiere algo o toda su energía a cualquier material a través del cual pasa.

**ACTIVIDAD:** es el número de desintegraciones nucleares de un material dado por unidad de tiempo.

**ALFA PARTICULA:** es una fuerte partícula ionizante emitida desde un núcleo pesado durante el decaimiento radiactivo que tiene una masa y carga igual al núcleo del He.

**BETA PARTICULA :** es una partícula cargada que es emitida desde el núcleo de un átomo en proceso de estabilización, es técnicamente un electrón.

**BREMSSTRAHLUNG:** es la radiación electromagnética asociado con el poder de frenado de una partícula cargada que pasa a través de la materia. Este efecto es habitualmente encontrado en emisores  $\beta$  de alta energía.

**CUENTAS:** es la indicación externa de un registrador para enumerar los eventos ionizantes en un período determinado, este término es erróneamente usado para indicar una desintegración, un pulso de voltaje.

**CURIE:** es una unidad de medición de la actividad de una muestra radiactiva, y corresponde a un número finito de desintegraciones por unidad de tiempo.

**DOSIS:** es un término general que denota la cantidad de radiación o energía absorbida por una cantidad específica de materia.

**DOSIS ABSORBIDA:** es la energía cedida a la materia por energía ionizante por unidad de masa. La unidad de dosis absorbida es el rad ( $100 \text{ ergs/gramo}$ ).

**DOSIS EQUIVALENTE:** es una unidad de dosimetría para medir el daño biológico, la unidad en que se expresa la dosis equivalente es el rem; el cual es numéricamente igual al producto de la dosis absorbida por el factor de calidad, y otros factores.

**DECAIMIENTO RADIOACTIVO:** es el fenómeno por el cual un núcleo inestable emite radiaciones y emisión espontánea de partículas.

**EFICIENCIA:** es la medición de la probabilidad de que las desintegraciones sean registradas por un detector asociado a un instrumento que cuantifica la radiactividad. Depende de otros factores tales como energía de la radiación, ventana del monitor, etc.

**ELECTRON VOLT:** es una unidad de energía, que equivale a la energía ganada por un electrón cuando es sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio.

**EFEECTO FOTOELECTRICO:** es la pérdida de energía de la radiación G cuando interacciona con la materia, y se observa la emisión de una partícula cargada desde el núcleo de un átomo, generalmente electrones

**EFEECTO COMPTON:** es un fenómeno muy parecido al efecto fotoeléctrico, solo que el fotón proveniente de una radiación G interactúa con electrones orbitales externos del átomo transfiriendo parte de su energía

**GAMMA RAYOS :** es radiación electromagnética de longitud de onda muy corta y de alto poder penetrante, generalmente asociada al proceso de decaimiento radiactivo de núcleos pesados.

**GEIGERMUELLER :** es un detector de radiación ionizante utilizado fundamentalmente para medir radiaciones originadas por emisores  $\alpha$ .

**IONIZACION:** es el proceso por el cual un átomo neutro adquiere tanto una carga positiva o negativa por un agente externo.

**ISOTOPOS:** núcleos que tienen un mismo número de protones en su núcleo, y por lo tanto, su número atómico, pero difieren en el número de neutrones, y por lo tanto en el número másico. Poseen idénticas propiedades químicas que el elemento natural.

**VIDA MEDIA:** es el tiempo requerido para que una especie radiactiva disminuya en un 50% la actividad inicial. Es un valor típico para cada especie radiactiva.