

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
GERENCIA DE PROTECCION RADIOLÓGICA Y SEGURIDAD

CURSO DE VIGILANCIA MEDICA DE TRABAJADORES EXPUESTOS  
A RADIACIONES IONIZANTES EN CONDICIONES NORMALES Y ANORMALES

RADIODOSIMETRIA

Lic. Gustavo Massera

BUENOS AIRES-ARGENTINA  
22 de agosto-2 de setiembre 1988

# CONCEPTOS GENERALES DE RADIODOSIMETRIA

## 1. INTRODUCCION

Este apunte comprende las nociones conceptuales y definiciones de magnitudes con sus respectivas unidades de aplicación en radiodosimetría. Donde por radiodosimetría se entiende el conjunto de actividades destinadas a establecer cuantitativamente la relación causa-efecto entre un campo de radiación ionizante y la sustancia con que interactúa. El punto de partida para este fin será el establecimiento de magnitudes y sus correspondientes unidades, que representen los fenómenos físicos o algún aspecto particular resultante en forma completa y unívoca.

Las magnitudes en radiodosimetría se pueden clasificar en magnitudes de campo, que describen las características del campo de radiación en términos tales como cantidad de partículas y sus energías y magnitudes dosimétricas que describen los efectos del campo sobre la sustancia expuesta por medio de los procesos de interacción.

Tanto los conceptos como las definiciones que se describen están basados en las establecidas por la Comisión Internacional de Unidades y Mediciones de Radiación (ICRU) y de la Comisión Internacional de Radioprotección (ICRP).

## 2. DEFINICIONES DE TERMINOS

Ciertos términos empleados en las definiciones de magnitudes dosimétricas se especifican a continuación.

### 2.1. Ionización

Proceso mediante el cual uno o más electrones son liberados de átomos, moléculas o cualquier otro estado ligado en que se encontrasen. Este proceso implica la transferencia a un electrón ligado de suficiente energía para vencer las fuerzas actuantes que los retienen en una estructura determinada. (p.ej. efecto fotoeléctrico, dispersión Compton, etc).

### 2.2. Radiación Ionizante

Se refiere a las partículas que con o sin carga, poseen suficiente energía como para que en procesos de interacción con el medio produzcan ionización.

Sin embargo el proceso de ionización no es el único por el que la radiación puede transferir energía a un material. Otro fenómeno importante es el de excitación que puede acarrear consecuencias físicas, químicas o biológicas. Es por eso que la expresión "ionizante" involucra tanto a la ionización propiamente dicha como a la excitación en el material.

En relación con la forma de interactuar y los efectos tenidos en cuenta en dosimetría, se diferencia a la radiación ionizante según sean:

a) Directamente Ionizante; partículas cargadas (electrones, protones, partículas alfa, ec) que tienen suficiente energía para producir ionizaciones por colisión a través de la acción del campo de cargas.

b) Indirectamente Ionizante; partículas no cargadas (fotones, neutrones) que pueden liberar partículas directamente ionizantes.

### 3. MAGNITUDES DE CAMPO

El campo de radiación queda caracterizado mediante el establecimiento de magnitudes que se definen en base al número de partículas y sus energías.

Siendo N el número de partículas y R la energía radiante, energía de las partículas sin considerar la energía de sus masas en reposo, se han establecido las siguientes definiciones:

3.1. Flujo de Partículas : es la variación del número de partículas por unidad de tiempo.

$$\dot{N} = dN / dt \quad \text{unidad: } 1/s$$

3.2. Tasa de Fluencia de Partículas : es el número de partículas que inciden sobre una esfera de sección transversal "da" por unidad de tiempo.

$$\dot{\psi} = dN / da dt \quad \text{unidad: } 1/m^2 s$$

Se considera que "da" es una pequeña superficie circular con la propiedad de orientarse perpendicularmente a cada componente direccional del campo. Esta superficie al rotar genera un volumen esférico, por lo que es equivalente tomar las partículas que entran a la esfera de volumen elemental que si inciden perpendicularmente sobre un elemento de superficie "da".

3.3. Fluencia de Partículas; expresa el número total de partículas que inciden sobre la esfera elemental de sección "da" durante un intervalo de tiempo.

$$\phi = dN / da \quad \text{unidad: } 1/m^2$$

3.4. Flujo de Energía: es la variación de energía radiante R por unidad de tiempo.

$$\dot{R} = dR / dt \quad \text{unidad: J/s}$$

3.5. Fluencia de Energía: es la energía radiante que ha incidido sobre una esfera de sección transversal da durante un intervalo de tiempo.

$$\Psi = dR / da \quad \text{unidad: J/m}^2$$

3.6. Tasa de Fluencia de Energía: es el incremento de la fluencia por unidad de tiempo.

$$\dot{\Psi} = dR / da dt \quad \text{unidad: J/m}^2\text{s}$$

### 3.7. Distribuciones

Además de las magnitudes de campo mencionadas puede ser necesario discriminar diferentes tipos de radiación y se podrá especificar por ejemplo la fluencia de energía cuando los distintos tipos de radiación tengan energías bien definidas. Si por otra parte, cualquier valor de energía es posible se deberá disponer de una expresión analítica que exprese el número de partículas por intervalo diferencial de energía del campo de radiación en un punto.

Sea  $\phi(E)$  el número de partículas con energías comprendidas entre 0 y E. La distribución diferencial de la fluencia respecto a la energía es:

$$\phi_E = d\phi(E) / dE$$

luego se tiene integrando:

$$\phi = \int_0^{\infty} \phi_E dE$$

La integral de la función distribución sobre la energía determina la fluencia de partículas correspondiente al intervalo de energías de integración.

## 4. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS

### 4.1. Energía Impartida

Se define la magnitud Energía Impartida, como la energía que el campo de radiación cede en procesos de ionización, al me-

dio expuesto en un punto, según el balance siguiente.

$$\epsilon = R_i - R_o + \sum Q \quad \text{unidad: Joule}$$

donde:

$R_i$  : energía radiante, excluyendo energías de masas en reposo de todas las partículas directa o indirectamente ionizantes que hayan entrado al volumen.

$R_o$  : energía radiante, excluyendo energías de masas en reposo, de todas las partículas directa o indirectamente ionizantes que hayan abandonado el volumen.

$\sum Q$  : todas las energías gastadas en todas las transformaciones de núcleos y de partículas elementales que hayan ocurrido dentro del volumen.

Las interacciones en las cuales  $Q=0$  son tales que en ellas no se produce ningún cambio en la masa en reposo total de núcleos y de partículas elementales.

Cuando  $Q < 0$ , esto implica que el proceso ha incrementado la masa en reposo total de núcleos y de las partículas elementales. Es decir, el proceso es tal que parte de la energía de la partícula interactuante es transformada en masa en reposo y esa energía de la radiación que es gastada para incrementar la masa en reposo no contribuirá a la energía impartida.

Las interacciones en las que  $Q > 0$  son aquellas en las cuales el proceso es tal que la masa en reposo total disminuye apareciendo como energía radiante.

#### 4.2. Dosis Absorbida

Se define a la magnitud " Dosis Absorbida" (D), como el cociente entre la energía impartida media por la radiación ionizante al material en un elemento de masa.

$$D = d\langle \epsilon \rangle / dm \quad \text{unidad: J/kg}$$

La unidad de esta magnitud es Joule/kg, con el nombre especial de Gray, abreviado Gy.

Esta unidad ha reemplazado a la anterior denominación de "rad" que equivale a 100 ergios/gramo.

La relación entre ambas unidades es: 1 Gy = 100 rad

Esta magnitud es de aplicación general para cualquier tipo de radiación ionizante.

### 4.3. KERMA

Para radiación indirectamente ionizante el proceso mediante el cual se imparte energía al medio se produce en dos etapas. En la primera de ellas, se transfiere la energía de las partículas indirectamente ionizantes a partículas cargadas y en el segundo paso se produce la distribución de energía en la secuencia de interacciones de clase coulombiana. La definición de dosis absorbida está relacionada con la segunda etapa del proceso. Mientras la primera etapa está descripta mediante la definición de la magnitud "Kerma" (K):

Suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas cargadas liberadas por partículas indirectamente ionizantes en una masa elemental.

$$K = \frac{dE}{dm} \quad \text{unidad: J/kg}$$

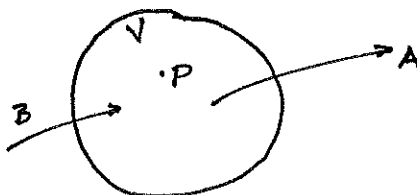
$E$  energía cinética transferida.  
 $dm$

Dado que en la definición se considera solo la energía "inicialmente transferida", queda entonces incluida toda otra forma de energía que no sea disipada por ionización por la partícula secundaria, tal como radiación de frenamiento.

### 4.4. Equilibrio Electrónico

Tanto los rayos X o gamma como los neutrones depositan energía a través de un proceso de dos etapas, como fue descrito, en el cual queda de manifiesto la importancia del campo de radiación de partículas cargadas como vehículo para impartir la energía del campo de partículas indirectamente ionizantes incidente.

Si enfocamos la atención en las partículas cargadas que entran y salen del volumen  $V$ , y si para cada partícula cargada  $A$  que transporta una cierta energía fuera de  $V$  existe otra partícula cargada  $B$  que transporta la misma energía hacia el volumen  $V$  entonces decimos que en el punto  $P$  hay equilibrio de partículas cargadas.



Debe quedar claro que la condición de equilibrio electrónico se refiere a la energía que transportan las partículas cargadas y no a su número.

#### 4.5. Relación Dosis Absorbida - Kerma

En condiciones de equilibrio electrónico y supuesto que la cantidad de energía liberada como radiación de frenado es despreciable, se pueden establecer la igualdad numérica entre dosis absorbida y kerma. Para demostrarlo se considera nuevamente el balance de energía radiante discriminando si son partículas cargadas o no.

Si identificamos por el subíndice "c" a la contribución de las partículas secundarias cargadas, y por el subíndice "u" las contribuciones debidas a partículas no cargadas, la ecuación para la energía impartida al material será:

$$\epsilon = R_{i,c} - R_{o,c} + \sum Q_c + R_{i,u} - R_{o,u} + \sum Q_u$$

La contribución de partículas no cargadas "u" se refiere al primer proceso de interacción de las partículas indirectamente ionizantes.

Si se considera despreciable el aumento de la energía en reposo producido por partículas cargadas, es decir que:

$$\sum Q_c = 0$$

Por otra parte  $R_{i,u} - R_{o,u} + \sum Q_u$  es justamente la suma de las energías cinéticas iniciales de las partículas cargadas liberadas por radiaciones indirectamente ionizantes en el volumen elemental que rodea el punto de interés. Por lo tanto:

$$R_{i,u} - R_{o,u} + \sum Q_u = E_{tr}$$

luego:

$$\epsilon = R_{i,c} - R_{o,c} + E_{tr}$$

Por el momento supondremos que la energía cinética de estas partículas cargadas no puede ser convertida en energía de partículas sin carga (por ejemplo radiación de frenamiento). Si existe equilibrio de carga entonces:

$$R_{i,c} = R_{o,c}$$

por tanto:  $\epsilon = E_{tr}$

entonces, tomando incrementos:

$$\Delta \epsilon / \Delta m = \Delta E_{tr} / \Delta m$$

de donde finalmente queda:

$$D = K$$

En el caso en que las partículas cargadas secundarias usen parte de su energía en la producción de partículas no cargadas (frenamiento) una parte de la  $E_{tr}$  convertida de gamma en partículas secundarias cargadas, es convertida a su vez en rayos X que pueden escapar del elemento de volumen, entonces

$$\Delta \epsilon < \Delta E_{tr}$$

La validez de la igualdad dosis-kerma está limitada a casos en los que la radiación de frenamiento es despreciable, es decir que no supere el 5% de la energía inicial.

#### 4. Exposición

Su definición es específica para radiación X ó gamma y se corresponde con un procedimiento práctico para detectar a este tipo de radiación que consiste en recolectar y contar las cargas eléctricas que éste produce en su interacción con el aire, sin considerar las energías involucradas en los procesos de ionización.

Exposición (X) es el cociente  $dQ/dm$  donde  $dQ$  es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos los electrones liberados por fotones en un volumen elemental de aire cuya masa es  $dm$  son completamente frenados en aire.

$$X = dQ / dm \quad \text{unidad: C/kg}$$

La unidad práctica adoptada para esta magnitud se define operativamente a través de las cargas eléctricas colectadas mediante una cámara especial denominada de "aire libre". El nombre de la unidad es el Roentgen (R) y equivale a una cantidad de cargas por unidad de masa de 0,000258 Coulomb/kg.

#### Relación entre D y X

Habiendo establecido el valor de exposición X en un punto del campo de radiación de fotones, es posible conocer el valor de la dosis absorbida D en ese punto para cualquier otra sustancia mediante la siguiente fórmula, expresando D en Gy.

$$D_s = 0,869 \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_s / \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a X = f \cdot X \quad (10 \text{ Gy/R})$$



donde  $\mu_{en}/\rho$  es el coeficiente de absorción másico en energía para la sustancia (s) y el aire (a). Cuando la sustancia considerada es el tejido muscular, el valor  $f$  es aproximadamente 0,95.

## 5. CALIDAD DE LA RADIACION Y TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGIA

Las radiaciones ionizantes pueden inducir muchos cambios físicos, químicos y biológicos, la clase y magnitud del cambio depende a menudo de las condiciones físicas de irradiación y en muchas circunstancias tiene una gran importancia un factor que llamaremos "calidad" de la radiación.

En general los efectos radioinducidos dependen de la distribución espacial de la energía impartida al medio por una partícula cargada. Es decir que el efecto observado no solo depende de la dosis absorbida sino del tipo y energía de la radiación ionizante que los produjo.

En particular importa la descripción de la calidad en términos de la llamada Transferencia Lineal de Energía o LET. Muchos fenómenos radioinducidos dependen de la distribución espacial de transferencia discreta de energía de una partícula cargada al medio irradiado. En algunos sistemas, por ejemplo, un gran número de interacciones con transferencia de energía por unidad de longitud de traza de una partícula, favorece una gran producción de un producto y una baja producción de otro.

Es importante tener en cuenta que no es posible establecer una única interpretación de LET en los cambios radioinducidos que sea válida para todas las circunstancias. En algunos casos, cuando se conoce el efecto de una determinada dosis absorbida de un tipo de radiación, se desearía predecir el efecto de una dosis absorbida similar pero de una radiación diferente. Para hacer esto deberían describirse previamente los aspectos de calidad de ambas radiaciones. Sin embargo, los efectos estocásticos de las interacciones de la radiación con la materia hacen imposible realizar una descripción lógica y exhaustiva.

El problema práctico es por lo tanto obtener una caracterización conveniente de la radiación y tan completa como sea posible. Se define la Transferencia Lineal de Energía  $L$  de partículas cargadas en un medio, al cociente de  $dE$  por  $dl$ , donde  $dl$  es la distancia recorrida por la partícula y  $dE$  es la pérdida media de energía debida a colisiones, con transferencia de energía en cada evento, menor o igual a

$$L_{\Delta} = dE / dl \Delta$$

Las pérdidas de energía son a veces consideradas como local-

el LET cuando tomamos como corte de energía el valor 100 eV. Por otra parte  $L_{00}$  se utiliza para simbolizar el caso en que se consideran todas las transferencias de energías. Sin embargo esto no indica que pueda hacerse una transferencia de energía infinitamente grande pues siempre existen otras limitaciones gobernadas por el tipo y velocidad de la partícula incidente.

Vamos a tratar de interpretar el sentido de delta. Cuando una partícula cargada atraviesa la materia, su forma principal de perder energía es por medio de interacciones con electrones atómicos. Dependiendo del parámetro de impacto estas interacciones pueden ser distantes o cercanas, es decir que puede producirse una ionización localizada en la traza de la partícula o una gran transferencia de energía que lleva a la eyección de un electrón atómico de suficiente energía como para producir posteriores eventos de ionización. La energía puede ser suficientemente baja como para producir una nube de iones separada conocida con el nombre de rayo delta.

La acción biológica de la radiación se debe a la absorción de energía en pequeños volúmenes frecuentemente llamados "sitios" de dimensiones del orden de 1  $\mu\text{m}$ . Esta distancia corresponde al alcance de electrones en tejido con una energía de 6 keV. Es por lo tanto evidente que si una partícula produce un rayo delta que tiene una energía superior a 10 keV no puede suponerse que disipe su energía localmente puesto que parte de su energía inicial la disipará fuera del "sitio". Es por esto que se establece un valor de corte de tal forma de poder asegurar que la energía ha sido localmente impartida y reconociendo como rayo delta a aquellos que tengan una energía mayor o igual que la de corte y considerándolos por tanto como partículas separadas.

## 6. MAGNITUDES DE PROTECCION RADIOLOGICA

### 6.1. Dosis Equivalente

En protección radiológica es necesario disponer de una magnitud que permita establecer una correlación conveniente entre los valores determinados a partir de magnitudes de campo y dosimétricas que describen la irradiación y los efectos biológicos observados.

Para ello se ha definido la magnitud Dosis Equivalente (H), que está dirigida las implicancias biológicas para exposiciones a niveles de dosis absorbidas en situaciones normales de protección radiológica, es decir cuando los efectos previstos son estocásticos.

$$H = DQN$$

$$\text{unidad: J/kg}$$

La unidad recibe el nombre especial de Sievert (Sv).

Donde Q es el factor de calidad expresado en términos de L y

N es el producto de todos los demás factores modificantes que se puedan llegar a introducir, por ahora ese valor es la unidad.

En el caso en que la dosis absorbida es producida por partículas que tienen un valor determinado de  $L_{\infty}$ , la relación entre LET y Q es la siguiente:

$L_{\infty}$ (en agua) (keV/um)	Q
< 3.5	1
7.0	2
23.0	5
53.0	10
175.0	20

Cuando se desconoce el espectro de dosis absorbida, pueden emplearse aproximaciones aceptables de Q para ciertos tipos de radiación primaria. Por ejemplo en ausencia de información sobre un espectro de neutrones es una simplificación posible usar el valor de  $\langle Q \rangle = 20$  para convertir a dosis equivalente.

La siguiente tabla da los valores medios recomendados para  $\langle Q \rangle$  según el tipo de radiación y energía.

Tipo de Radiación	$\langle Q \rangle$
Rayos X , gamma y electrones . . . . .	1
Neutrones térmicos . . . . .	2,3
Protones y partículas con una carga y cualquier energía. . . . .	10
Neutrones, partículas alfa y partículas cargadas pesadas con más de una carga y cualquier energía. . . . .	20

Estos factores de calidad han sido elegidos para representar la efectividad de los distintos tipos de radiación ionizante en la producción de efectos nocivos a bajas dosis, casos en que la ocurrencia del efecto es de tipo estocástico. Es importante, por tanto, que la dosis equivalente no sea utilizada para establecer las probables consecuencias inmediatas en exposiciones accidentales.

## 6.2. Dosis Equivalente Efectiva

Desde el punto de vista de la protección radiológica y con el objeto de limitar el riesgo de efectos estocásticos, el ICRP en su publicación número 26, introdujo el concepto de limitación de la exposición ponderada promedio de todo el

cuerpo. Este se ha basado en el principio de que para un cierto nivel de protección, el riesgo debe ser el mismo, si el cuerpo entero es irradiado uniformemente, o si la irradiación es no uniforme o parcial.

Esta condición se satisface aplicando la limitación a la siguiente expresión como definición de esta magnitud:

$$H = \frac{W}{E} \frac{H}{T} \quad \text{Sievert (Sv)}$$

donde:

$W_T$  es un factor que representa la proporción del riesgo debido a efectos estocásticos resultantes en el tejido u órgano T respecto al riesgo total por efectos estocásticos cuando se irradia uniformemente todo el cuerpo.

$$W = \frac{r}{R} \quad T \quad T$$

donde  $r$  es el riesgo por unidad de dosis al órgano T y R es el riesgo total por irradiación uniforme de todo el cuerpo por unidad de dosis.

$H_T$  es la dosis equivalente media en el tejido u órgano T.

Los valores de  $W_T$  recomendados se muestran a continuación:

Organo/Tejido	$W_T$
Gonadas	0,25
Mamas	0,15
Médula ósea roja	0,12
Pulmón	0,12
Tiroides	0,03
Hueso (superficie)	0,03
Resto	0,30

El Resto corresponde a los cinco órganos o tejidos que reciben la más alta dosis equivalente (fuera de los indicados en tabla) y se desprecian los restantes. Se deberá tomar  $W = 0,06$  para cada uno de ellos. Este procedimiento de asignar el mismo coeficiente de riesgo a todos los tejidos y órganos no mencionados en la tabla es una simplificación que solo afecta al método de cálculo. La definición en si misma cubre a todos los órganos o tejidos.

En la determinación de la Dosis Equivalente Efectiva no interesa en principio que la dosis equivalente en un determinado órgano resulta de una irradiación interna o externa. Todo lo que se requiere en la evaluación es determinar la dosis equivalente en cada órgano por efecto de las distintas fuentes, luego multiplicar por el correspondiente factor de ponderación y sumar los resultados.

### 6.3. Magnitudes Índice

La naturaleza del problema dosimétrico con fines de protección radiológica se puede resumir en los siguientes aspectos:

- a) La capacidad de penetración de la radiación.
- b) La geometría del campo de radiación.
- c) Ubicación de órganos y tejidos constituyentes del cuerpo.

Debido a la imposibilidad de medir directamente la dosis equivalente es que se recurre al empleo de otras magnitudes que si lo son, a las que se denomina operacionales y que difieren para los distintos tipos de radiación por razones fundamentalmente ligadas al desarrollo de las técnicas de medición.

Alguna de estas magnitudes operacionales son por ejemplo, exposición para radiación X y gamma, dosis absorbida en tejido bajo un espesor determinado para radiación beta o máxima dosis equivalente en superficie del cuerpo para neutrones. Esto llevó a considerar la necesidad de disponer de una magnitud de tipo dosis equivalente que fuera uniforme para todo tipo de radiación y que incorporase simultáneamente la condición de receptor es decir definida sobre una masa comparable a la del cuerpo humano. Para ello se definieron (ICRU 1971) las denominadas magnitudes Índice, incorporando en su definición como receptor una esfera de 30 cm de diámetro compuesta por una sustancia equivalente a tejido blando.

#### Definiciones

a) Índice de Dosis Absorbida (DI) en un punto es la máxima dosis absorbida dentro de una esfera de 30 cm de diámetro centrada en ese punto y compuesta de material equivalente a tejido blando con una densidad de 1 g/cm<sup>3</sup>.

b) Índice de Dosis Equivalente (HI) en un punto es la máxima dosis equivalente dentro de una esfera de 30 cm de diámetro centrada en ese punto y compuesta de material tejido blando con una densidad de 1 g/cm<sup>3</sup>.

A efectos de diferenciar el tipo de radiación conforme a su capacidad de penetración y poder dar resultados en términos de radiación poco penetrante que implica dosis superficial o cuando es penetrante que determinaría dosis en profundidad, se ha diferenciado a la esfera en varios sectores, dividiéndola en dos capas y un núcleo.

La primera capa de un espesor de 0.07 mm representativa del valor medio de la capa basal de la epidermis donde los efectos de la radiación no se tienen en cuenta. La capa siguiente hasta una profundidad de 1 cm corresponde a la zona donde se encontraría el valor máximo de dosis absorbida o equivalente para radiación poco penetrante, denominándose "superficial" a la magnitud índice. El núcleo interior con un diámetro de 14 cm permite determinar la magnitud índice para radiación penetrante denominada "profunda".

Las siguientes son las definiciones establecidas para los distintos tipos de capacidad de penetración:

Radiación poco penetrante: si la dosis equivalente en una pequeña área de la piel es 10 veces mayor que la dosis equivalente efectiva, para un campo uniforme y unidireccional en una dada orientación del cuerpo.

Radiación penetrante: si la dosis equivalente en una pequeña área de la piel es 10 veces menor que la dosis equivalente efectiva, para un campo uniforme y unidireccional en una dada orientación del cuerpo.

Las magnitudes Índice han resultado ser inherentemente no aditivas, con lo que se quiere decir que por ejemplo el índice de dosis equivalente resultante HI de la superposición de los índices parciales HIi producidos por varias componentes i del campo de radiación incidente con diferentes energías y direcciones, no es generalmente la suma aritmética de esas componentes. En cambio vale la siguiente desigualdad

$$H_I < \sum_i H_{I_i}$$

Esto tiene a su vez la consecuencia de que el índice no es en general la integral temporal de la tasa si el campo cambia en energía y distribución angular en el tiempo, es decir se verifica en general que;

$$H_I < \int_I \dot{H}_I(t) dt$$

En conclusión un instrumento previsto para medir magnitudes Índice, solo lo puede hacer para una distribución de energía y de dirección en particular. En otras palabras, la calibración de un instrumento en unidades de HI no será válida para energías y geometrías de campo distintas de las existentes durante la calibración.

Con el objeto de lograr magnitudes que manteniendo las consideraciones primarias que dieron lugar a las magnitudes índices pero permitan la realización práctica de mediciones, se han definido un conjunto de nuevas magnitudes (ICRU 39) que conllevan a su vez las consideraciones siguientes:

1) La conveniencia de que la determinación de H se pueda relacionar con H y H<sub>piel</sub> a la vez que separar según corresponda a mediciones de monitoreo ambiental o individual.

2) Se estipula para el campo de radiación, teniendo en cuenta que el volumen de los instrumentos de medición son pequeños frente a la esfera ICRU e independientes de la orientación, que para tener una relación unívoca entre ambos se debe supo-

ner que el campo exhibe sobre la esfera las mismas características físicas que sobre el instrumento detector. Para ello se asume que el campo sobre el detector se lo expande y alinea para abarcar a la esfera, el significado de este procedimiento es el siguiente:

Expandido: corresponde a un campo (hipotético) de radiación uniforme que tiene en todo punto del espacio y para cada tipo de radicación la misma fluencia, distribución espectral y angular que las que existen en el punto de referencia donde se hace la medición sin el receptor.

Alineado: se lleva cada componente del campo según su dirección de incidencia en el punto de referencia a formar un haz paralelo manteniendo cada componente su fluencia y distribución espectral constante.

#### 6.4. Magnitudes de aplicación al monitoraje ambiental

Las mediciones de niveles de radiación ambiente son de carácter anticipatorio respecto de la presencia del trabajador o confirmatorios respecto a la verificación del cumplimiento de niveles autorizados.

##### 6.4.1. Dosis Equivalente Ambiente Penetrante $H^*(d)$

Es la dosis equivalente para un campo alineado y expandido sobre la esfera ICRU a la profundidad  $d$ .

Se recomienda  $d = 10$  mm, luego se designa  $H^*(10)$ . Un instrumento de medición con respuesta isotrópica y calibrado en  $H^*$  va a medir esta magnitud en cualquier campo que sea uniforme sobre el detector contemplando radiación retrodispersada.

##### 6.4.2. Dosis Equivalente Direccional $H'(d)$

Es la dosis equivalente que sería producida por el correspondiente campo expandido sobre la esfera ICRU a una profundidad  $d$ , según un radio en una dada dirección.

Se recomienda una profundidad  $d = 0.07$  mm luego se puede indicar  $H'(0.07)$ .

Un instrumento que determina la dosis equivalente a la profundidad recomendada en un "slab" de material equivalente a tejido blando, determinará adecuadamente  $H'$  para radiación poco penetrante si el "slab" tiene su superficie perpendicular a la dirección de incidencia del haz, el cual es uniforme sobre el detector.

#### 6.5. Magnitudes de aplicación al monitoraje individual

Estas magnitudes deben tener en cuenta tanto la atenuación como la dispersión que produce el cuerpo sobre el campo pero muy especialmente deberán considerar la distribución angular del campo incidente respecto a la dependencia direccional de la dosis equivalente efectiva.

#### 6.5.1. Dosis Equivalente Individual, Penetrante, $H_p(d)$

Es la dosis equivalente bajo un espesor adecuado de material al equivalenmte a tejido blando, en un punto del cuerpo. La profundidad  $d$  debe ser la adecuada para radiación penetrante.

Para tener en cuenta órganos profundos se toma  $d=10$  mm, luego se indica  $H_p(10)$ .

$H_p(10)$  es medible con un detector portado sobre la superficie del cuerpo y cubierto con un espesor adecuado de material equivalenmte a tejido blando.

#### 6.5.2. Dosis Equivalente Individual, Superficial, $H_s(d)$

Es la dosis equivalente en tejido blando en un punto determinado del cuerpo a la profundidad  $d$ , que sea adecuada para radiación poco penetrante.

Se recomienda que la profundidad  $d$  adecuada para el monitoreo individual sea 0.07 mm, luego se indica  $H_s(0.07)$ .

### 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) ICRU Report 33 (1980)  
Radiation Quantities and Units.
- 2) ICRU Report 39 (1985)  
Determination of Dose Equivalent Resulting from External Radiation Sources.
- 3) ICRP Report 26 (1977)  
Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- 4) ICRP Report 51 (1987)  
Data for Use in Protection Against External Radiation.
- 5) H. Attix, W.C. Roesch, E. Tochilin.  
Radiation Dosimetry  
Academic Press, 1969.