

CNEA-AC 62/85

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE PROTECCION RADIOLOGICA Y SEGURIDAD

Curso Protección Radiológica y Seguridad Nuclear

Nivel Técnico

TEMA: CALCULO DE DOSIS

Ing. Roberto VALLOUD

Buenos Aires

1985

CALCULO DE DOSIS

Ing. Roberto Valloud

1.- DOSIMETRIA DE FUENTES GAMMA

1.1.- Constante específica Gamma:

Para poder efectuar el cálculo de dosis de individuos profesionalmente expuestos a irradiación externa, es necesario definir determinadas magnitudes, que evaluadas a través de distintos pasos de cálculo, permiten generar el dato final que es la DOSIS INDIVIDUAL.

Esta dosis se produce por efecto de la transferencia de energía de un haz de radiaciones al medio irradiado, fenómeno este, que se verifica en dos etapas.

En la primera, a través de alguno de los tres efectos de interacción conocidos: fotoeléctrico, Compton o formación de pares, en el que el fotón entrega parte, o toda su energía a un electrón del medio, y en el que la probabilidad de transferencia, de energía por unidad de recorrido del fotón, está cuantificada por el coeficiente de absorción (MU)/μ.

En la segunda etapa, la energía cinética del electrón, o positrón se transfiere al medio en que se mueven, fundamentalmente por la colisión con los electrones del medio.

La energía transferida por colisión, se traduce en ionización y excitación de los átomos. Precisamente, el concepto de DOSIS ha sido asociado, como se verá más adelante, con esta segunda etapa del proceso.

A efectos de poder evaluar entonces la transferencia total de energía de un haz a un medio irradiado, planteamos la expresión de la energía total electromagnética liberada por una fuente al espacio por unidad de tiempo. Esta está dada por la siguiente expresión.

$$\frac{dE}{dt} = A E_\gamma \times 3.7 \times 10^{10} \frac{\text{des}}{\text{seg Ci}} \quad \left[= \right] \frac{\text{MeV}}{\text{seg}} \quad (1)$$

donde:

A : Actividad de la fuente en Ci.

E : Energía del fotón en MeV./des.

Si se considera que el flujo energético se irradia en todas direcciones a partir de la fuente, se desprende que la superficie de barrido de ese flujo es el de una esfera con centro en el emisor y radio R.

Por lo tanto el flujo energético, o TASA DE FLUENCIA DE ENERGÍA estará dada por:

$$\dot{\psi} = \frac{dE}{dt} \frac{1}{S} = \frac{A E_\gamma \times 3.7 \times 10^{10}}{4 \pi R^2} \frac{\text{des}}{\text{seg Ci}} \quad \left[= \right] \frac{\text{MeV}}{\text{seg cm}^2} \quad (2)$$

y la tasa de fluencia por unidad de actividad de la fuente estará dada por:

$$\frac{\dot{\psi}}{A} = \frac{dE}{dt} \times \frac{1}{S} \times \frac{1}{A} = \frac{E_\gamma \times 3.7 \times 10^{10}}{4 \pi R^2} \frac{\text{des}}{\text{seg Ci}} \quad \left[= \right] \frac{\text{MeV}}{\text{seg cm}^2 \text{ Ci}} \quad (3)$$

pero nos interesa como primer sistema físico real, a aquella fracción de la energía que atraviesa una superficie unitaria y que es absorbida por una masa de aire, también unitaria por lo que de (3), multiplicando por el coeficiente másico de absorción del aire, expresado en cm²/g. queda:

$$\frac{\dot{\psi}}{A} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{aire}} = \frac{E_\gamma \times 3.7 \times 10^{10}}{4 \pi R^2} \times \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{aire}} \frac{\text{des}}{\text{seg Ci}} \quad \left[= \right] \frac{\text{MeV}}{\text{seg g Ci}} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que la energía absorbida por la masa unitaria de aire, genera en la misma una ionización, y que por cada par, lleva asociada una determinada carga eléctrica, se puede introducir en (4) factores que nos indiquen la carga eléctrica producida en la masa de aire en cuestión, dichos factores son:

Q: 1,602 * 10⁻¹⁹ coulombs/ion.

W: 3,37 * 10⁻⁵ MeV/ion: 33,7 eV/ion.

por lo que:

$$\frac{\dot{\psi}}{A} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{aire}} \times \frac{Q}{W} = \frac{E_\gamma \times 3.7 \times 10^{10} \times 1.602 \times 10^{-19}}{4 \pi \times 3.37 \times 10^{-5}} \times \frac{\text{Coulombs}}{\text{MeV}} \times \frac{\text{des}}{\text{seg Ci}} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{aire}} \quad (5)$$

y como por definición de unidad de exposición: 1 Roentgen: 2,58 * 10⁻⁴ C/kg. se observa que de (5), se obtiene:

$$\Gamma \left(\frac{R}{hA} \right)_{\text{cm}} = \frac{\dot{\psi}}{A} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{aire}} \times \frac{Q}{W} = 19,51 E_\gamma \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{aire}} \quad (6)$$

Las unidades de (5) son Coulomb/g Sec Ci.

Otra definición de Roentgen: es la cantidad de radiación X ó γ que produce 1 UES (q) en $1,29 \cdot 10^{-3}$ g (1,29 mg) de aire, ó (un centímetro cúbico)

De aquí se deduce:

$$1R = \frac{1 \rho J}{4,8 \cdot 10^{-10} \text{ UES (q)}} \cdot 33,7 \frac{\text{eV}}{\rho J} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{erg}}{\text{eV}} \cdot \frac{1}{1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g}} = 86,9 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$$

La utilidad del Roentgen se pone de manifiesto si se considera que para el caso de irradiación externa, la dosis absorbida en cualquier punto del organismo depende del tipo de energía de radiación, del camino dentro del organismo al punto en estudio y de la constitución elemental del medio absorbente; por ejemplo: tejido bando (C, O, H, N), hueso (Ca, P) etc.

Por esta razón usualmente se especifican los campos de radiación en unidades que nos dan la cantidad de E transferida del campo a la unidad de masa de aire en el lugar en cuestión y que operacionalmente son muy fáciles de medir.

El ICRU define "exposición" como el cociente de $\Delta q / \Delta m$, donde Δq es la sumatoria de las cargas eléctricas de todos los iones de 1 signo producidos en aire cuando todos los e^- y e^+ liberados por fotones en un volumen elemental de aire cuya masa en Δm son completamente frenados en aire.

Se observa que $\Gamma \gamma$ es la magnitud que buscamos, que nos permite efectuar el primer cálculo de exposición.

En el caso en que la fuente emita fotones de diferentes energías, en $E \gamma$ se deberán computar los valores de cada una de las energías de acuerdo a la proporción relativa por desintegración (PI).

$$\Gamma = 30,5 \frac{1}{\rho} \sum E \gamma_i \mu_i \text{ PI} \quad (7)$$

Se debe notar finalmente que: $\Gamma = f(E)$

1.2.- Exposición a distancia:

Se llama exposición de R_x ó $R \gamma$ en un cierto punto a una medida de la radiación que se ba-

sa en la capacidad ionizante de esta.

Suponiendo una fuente puntual, de la cual se conoce la constante r , puede hallarse el valor de la exposición a una distancia R cualquiera, teniendo en cuenta que la atenuación del haz es función cuadrática inversa de la distancia. Se asume además que no hay absorción por parte del medio interpuesto, entre fuente y blanco.

$$\therefore X = \Gamma \cdot A \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{R^2} = \Gamma \cdot A \cdot 10^4 \text{ cm}^2 / R^2 \quad (8)$$

donde:

X : tasa de exposición en R/h: dQ/dm.

Γ : constante gamma en R/h.Ci. (a 1 mts.)

A : Actividad de la fuente.

R : Distancia en metros.

En el caso en que entre fuente y blanco haya interpuesto un medio absorbente, capaz de provocar tanto la atenuación como la dispersión del haz fotónico, la expresión (8) se modifica por los coeficientes de atenuación lineal (μ) y el factor de acumulación (B) Build-up.

dQ: es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producido en aire, cuando todos los electrones liberados por los fotones en un elemento de aire de masa dm. son completamente frenados en aire.

$$X = \Gamma \cdot A \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{R^2} \cdot e^{-\mu x} \cdot B \quad (9)$$

1.3.- Dosis producida por una fuente puntual:

Se denomina dosis absorbida de cualquier radiación a la energía absorbida en la materia por unidad de masa de la misma en el punto de interés. La unidad de dosis es el rad que equivale a 100 erg/g.

rad: radiation absorbed dose

Se puede proceder al cálculo de la dosis, conociendo la actividad de la fuente y el valor de $E \gamma$, de la misma o sea conociendo su ψ .

En efecto: si

$$\psi = \frac{A \cdot E \gamma}{4 \pi R^2} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{des}}{\text{Sec Ci}}$$

y considerando ahora el coeficiente másico de absorción de la sustancia en cuestión tendremos:

$$\dot{\psi} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{sust.}} = \frac{A E_{\gamma}}{4 \pi R^2} \times 3,7 \times 10^{10} \frac{\text{des}}{\text{seg}} \times \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{a. a.}} \quad (10)$$

el primer miembro de la igualdad, representa la energía absorbida en la unidad de tiempo por unidad de masa de la sustancia en cuestión expuesta a un flujo (fi) $\dot{\psi}$

$$\dot{\psi} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{a. a.}} = \dot{D} = \frac{dD}{dt} \left[= \right] \frac{\text{MeV}}{\text{Sec g}} \quad (11)$$

donde $\dot{D}$ es tasa de dosis.

De la expresión (11), para obtener el resultado en rad/h. se introducen los siguientes factores de conversión:

1 Mev: $1,6 \times 10^{-6}$ ergios. Recordar que es una unidad de trabajo
1 rad: 100 ergios/gramo
1 h: 3.600 seg.

Por lo que:

$$\dot{D} \left(\frac{\text{rad}}{\text{h}} \right) = 1,696 \times 10^5 \frac{A \cdot E_{\gamma} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{sust.}}}{R^2} \quad (12)$$

Se ha hecho mención anteriormente a volúmenes pequeños, ésto es para que no influya en el cálculo de la dosis la dispersión del haz incidente, entendiéndose volúmenes mínimos en los cuales se mantenga equilibrio electrónico.

La dosis en un punto puede calcularse, si se conoce el valor $\dot{X}$ de la tasa de exposición en dicho punto.

$$\text{Si } \dot{X} \left(\frac{\text{R}}{\text{h}} \right) = 19,52 \times E_{\gamma} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{a. a.}} \times A \times \frac{10^4 \text{ cm}^2}{R^2}$$

que comparado con la expresión (12) demuestra la relación existente entre $\dot{D}$ y $\dot{X}$ Así:

$$\dot{D} = \dot{X} \frac{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{sust.}}}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{a. a.}}} \times 0,869 \quad (13)$$

lo que implica además, la misma relación para la dosis y exposición.

Así: $D = X \cdot f$ donde $f = 0,869$.

Para el caso de exposiciones en aire:

$$D_{\text{a. a.}} = \dot{X} \frac{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{a. a.}}}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{a. a.}}} \times 0,869 \quad (14)$$

Así, D (aire) en Rad = X (Roentgen) $\times 0,869$ o sea que cuando la exposición es de 1 rad, la dosis correspondiente en aire, es de 0,869 rad. La relación entre D y X , es una dada función tanto de la E gamma de los fotones, como de la sustancia considerada.

En general la efectividad biológica de una dada dosis absorbida es función del tipo de radiación y de las condiciones de irradiación.

Es así que en los procedimientos corrientes de protección radiológica, una indicación del efecto sobre un dado organismo se infiere pesando la dosis absorbida, en este organo, por ciertos factores modificantes, principalmente el de calidad de la radiación.

Se define por lo tanto la dosis equivalente como:

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

donde:

H : dosis equivalente.

D : dosis absorbida

Q : factor de calidad.

N : producto de otros factores modificantes.

En el caso en que D es liberada por partículas que tienen un valor determinado de transferencias lineal de energía (LET) el ICRP establece una tabla de relación entre los valores de esas transferencias lineales de energía y Q . Así:

LET	RADIACION	Q
3,5 ó <	gamma: de Ra en equilibrio con sus productos de fisio	1
	Rx	1
	R β e $^{-}$ con E 0,03 Mev	1
	R β e $^{-}$ con E 0,03 Mev	1,7
7,0	Neutrones térmicos	2
23		3
53	Neutrones rápidos	5
	protones R $^{+}$, iones pesados	10
175		20

1.4.- Exposición y dosis en función del tiempo:

Las tasas de exposición y dosis producidas por una fuente, dependen de la actividad de la misma, que a su vez es función del tiempo, por lo que si:

$$A = A_0 e^{-\frac{0.693}{T} t}$$

donde T es el tiempo de vida media del isótopo en cuestión, se pueden expresar las tasas $\dot{X}$ y $\dot{D}$ en función del tiempo de la siguiente manera:

$$\dot{X} = \Gamma \frac{1m^2}{R^2} A_0 e^{-\frac{0.693}{T} t} \quad (15)$$

$$\dot{D} = \Gamma \frac{1m^2}{R^2} f A_0 e^{-\frac{0.693}{T} t} \quad (16)$$

y los valores de exposición y dosis al cabo de un cierto tiempo T. estarán dados por las integrales en el tiempo de las ecuaciones (15) y (16) por lo que:

$$X = \Gamma \frac{1m^2}{R^2} A_0 \int_0^t e^{-\frac{0.693}{T} t} dt$$

$$D = \Gamma \frac{1m^2}{R^2} A_0 f \int_0^t e^{-\frac{0.693}{T} t} dt$$

1.5.- Equilibrio electrónico Kerma:

Según se ha visto, el fenómeno de transferencia de energía de radiación electromagnética a un material irradiado, involucra dos etapas:

En la primera, los fotones de haz incidente, comunican parte o toda su energía a los electrones o átomos del material, por uno o más de los 3 mecanismos clásicos de interacción: foto, Compton o pares. En la segunda etapa, los electrones transfieren esa energía al medio mediante su acción ionizante.

El concepto Kerma, está asociado con la primera etapa del proceso descrito, y el de dosis, como ya se mencionó, con la segunda.

Es importante por lo tanto considerar al expresión que lo define:

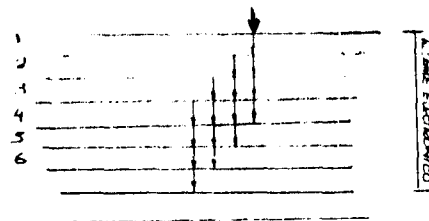
$$K = \Psi \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

Ψ = fluencia energética.

$\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ = coeficiente másico de transferencia.

Teniendo en cuenta, que la ionización que aporta dosis, es la desencadenada por partículas secundarias cargadas (electrones) y que en algunos casos, el alcance de los electrones puede llegar a ser considerable, es obvio que la transferencia de energía al medio, se concreta a una distancia determinada del punto inicial de interacción del haz fotónico con la materia.

La figura siguiente, ilustra el concepto de equilibrio electrónico.

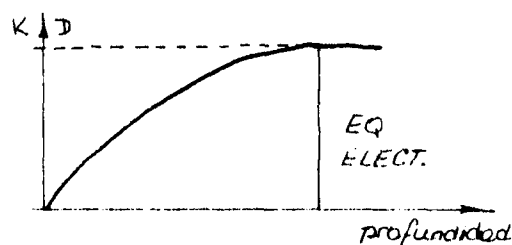


Se supone que en cada elemento de volumen el haz de fotones incidente, libera la misma cantidad de electrones, los que dan origen a ionizaciones a lo largo de su recorrido, por lo que si se contabilizan las ionizaciones producidas en el primer volumen de la figura, se tendría una cantidad parcial, que no es representativa de la energía cedida por el haz fotónico.

Contabilizando en cambio las ionizaciones producidas en el cuarto volumen de la misma figura, a una distancia mínima igual al alcance de los electrones, se tiene ahora sí, una cantidad de iones igual al total de los producidos por los electrones liberados en cada volumen.

Se dice que a partir del cuarto volumen, se tiene equilibrio electrónico, y que la ionización total medida en cada elemento subsiguiente corresponde a la energía total transferida por el haz de fotones en cada elemento o volumen.

La consecuencia inmediata, es que el valor de la dosis aumenta desde la superficie, hasta un máximo valor en un punto a una profundidad igual al alcance de los electrones secundarios, mientras que en cambio, el valor del Kerma, se mantiene constante desde la superficie en un valor igual al de la dosis máxima.



Corolario:

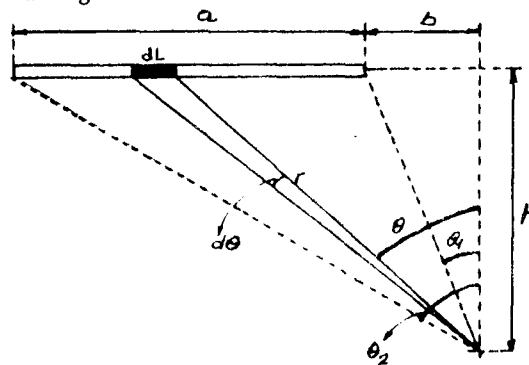
En presencia de equilibrio electrónico de partículas cargadas, la dosis absorbida es igual al KERMA.

1.6.- Aspectos geométricos de las fuentes:

Las expresiones para el cálculo de las dosis producidas por una fuente puntual, sirven para el cálculo de la dosis originadas por fuentes extensas. Al efecto se incluyen los siguientes ejemplos:

Fuentes lineales:

Es común en aplicaciones radioterapéuticas el empleo de fuentes tipo aguja conteniendo una Actividad (A) uniformemente distribuida en una longitud "a".



El problema consiste en calcular la tasa de exposición producida por la actividad distribuida en la fuente.

La tasa de exposición $\dot{X}$ producida por un elemento de la fuente será:

$$d\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot 1m^2 A}{r^2} dL$$

$$dL = \frac{r \cdot d\theta}{\cos \theta}$$

$$r = \frac{h}{\cos \theta} \quad \therefore d\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot 1m^2 A \cdot d\theta}{a \cdot h}$$

e integrando:

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot 1m^2}{a \cdot h} \cdot A \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta$$

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot 1m^2}{a \cdot h} \cdot A (\theta_2 - \theta_1)$$

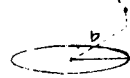
Por procedimientos similares de integración pueden calcularse las tasas de exposición producidos en un punto por otras fuentes llegándose a los siguientes resultados:

Fuentes anulares:



$$\dot{X} = \frac{A \cdot \Gamma \cdot 1m^2}{[(a^2 + b^2 + h^2)^2 - 4a^2b^2]^{3/2}}$$

Discos (fuente superficial)

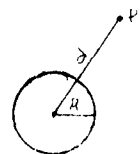


$$\dot{X} = \frac{A \cdot \Gamma \cdot 1m^2}{a^2} \ln \frac{a^2 - b^2 + h^2 + \sqrt{(a^2 - b^2 + h^2)^2 + 4b^2h^2}}{h^2}$$

para puntos del eje central (b = 0)

$$\dot{X} = \frac{A \cdot \Gamma \cdot 1m^2}{a^2} \ln \frac{h^2 + a^2}{h^2}$$

Esfera (fuente volumétrica)



$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot A \cdot 1m^2}{4R^3} \left[2d + \frac{R^2 - d^2}{d} \ln \left(\frac{R+d}{|R-d|} \right) \right]$$

1.7.- Teorema de la reciprocidad:

Enuncia que dos fuentes, que contienen la misma actividad total, producen, cada una en la otra, la misma dosis promedio, cualquiera sea la forma y el tamaño de las fuentes, y la distancia entre ellas.

Vale decir que las dosis promedio producidas por una cierta actividad concentrada en un punto dado sobre un volumen determinado, es igual a la dosis que se recibiría en ese punto, si la actividad estuviera uniformemente distribuida en el volumen en cuestión.

2.- RADIACION ALFA Y BETA

2.1.- Radiación Beta:

La determinación de dosis debido a irradiación externa, con partículas beta, se dife-

rencia radicalmente de la dosis debida a radiación gamma. Fundamentalmente, se ha de tener en cuenta, que ambas radiaciones son de distinta naturaleza, la gamma radiante, la beta corpuscular, por lo que la interacción de ambas con la materia, se llevará a cabo de muy distinta forma, y a través de distintos mecanismos.

Además una gran variedad de fenómenos, contribuyen a dificultar el cálculo por irradiación externa, entre ellas, su espectro energético, y la geometría de la irradiación.

No obstante, los cálculos de dosis sobre individuos expuestos, se reducen a una mínima expresión, no teniendo sentido el monitoraje más que en aquellas circunstancias en que las fuentes radiantes estén en contacto con la piel, ya que el alcance de las partículas beta es en el medio, muy reducido.

La ICRP, postula un modelo, en el que la dosis en piel, debe calcularse, asumiendo que el tejido radiosensitivo se extiende desde una profundidad de 70 micrones por debajo de la superficie epitelial, y que su espesor, si bien no es constante sobre todo el cuerpo, puede considerarse como máximo de 5 mm. de espesor.

Precisamente, éste espesor de células radiosensitivas, se asume como aquel en el que se cede la totalidad de la energía transportada por el haz, por lo que determinando el alcance de las partículas beta, con alguna de las fórmulas clásicas, por ej: expresión de Katz - Penfold, tendremos idea del recorrido del electrón en la capa de células muertas y/o en la radiosensible.

$$R(\text{mg/cm}^2) = 1,265 - 0,0954 \ln E$$

$$(para 0,01 < E < 2,5 \text{ MeV})$$

2.2.- Cálculo de dosis para fuentes beta, en contacto con el objeto:

El cálculo riguroso de la dosis, requiere el conocimiento del espectro beta y de numerosas consideraciones, como ya se ha mencionado.

No obstante, la dosis puede estimarse en una primera aproximación de acuerdo a los siguientes cálculos, especialmente en casos de interés biológico, tales como fuentes en contacto con la piel.

La dosis en la zona inmediatamente en contacto con la superficie, puede calcularse teniendo en cuenta la ionización específica producida por las partículas beta y el número de partículas que cruzan, o atraviesan la superficie por unidad de área.

Como se indica en gráfico adjunto, la ionización específica salvo para betas de muy baja energía, es de unos 10 pares de iones por micrón (en tejidos acuosos) y como la energía absorbida por par de iones producidos en tejido blando es de unos 35 eV., la transferencia lineal media de energía será de unos 350 eV/micrón. Se entiende que el número de pares iónicos es promedio.

Los electrones incidentes en la piel, seguirán trayectos distintos (desde rasantes, hasta perpendiculares). Como la inclinación promedio es de 45 grados, un electrón dejará en un espesor dX una energía que puede ser expresada por:

$$350 \text{ dV} / \sqrt{2} \times dX$$

Si la fuente, está distribuida sobre una gran superficie de piel, la energía cedida por partículas beta, se considera uniforme en toda la superficie en contacto con la misma

Luego, por cm^3 de tejido, en el plano superficial, se depositarán:

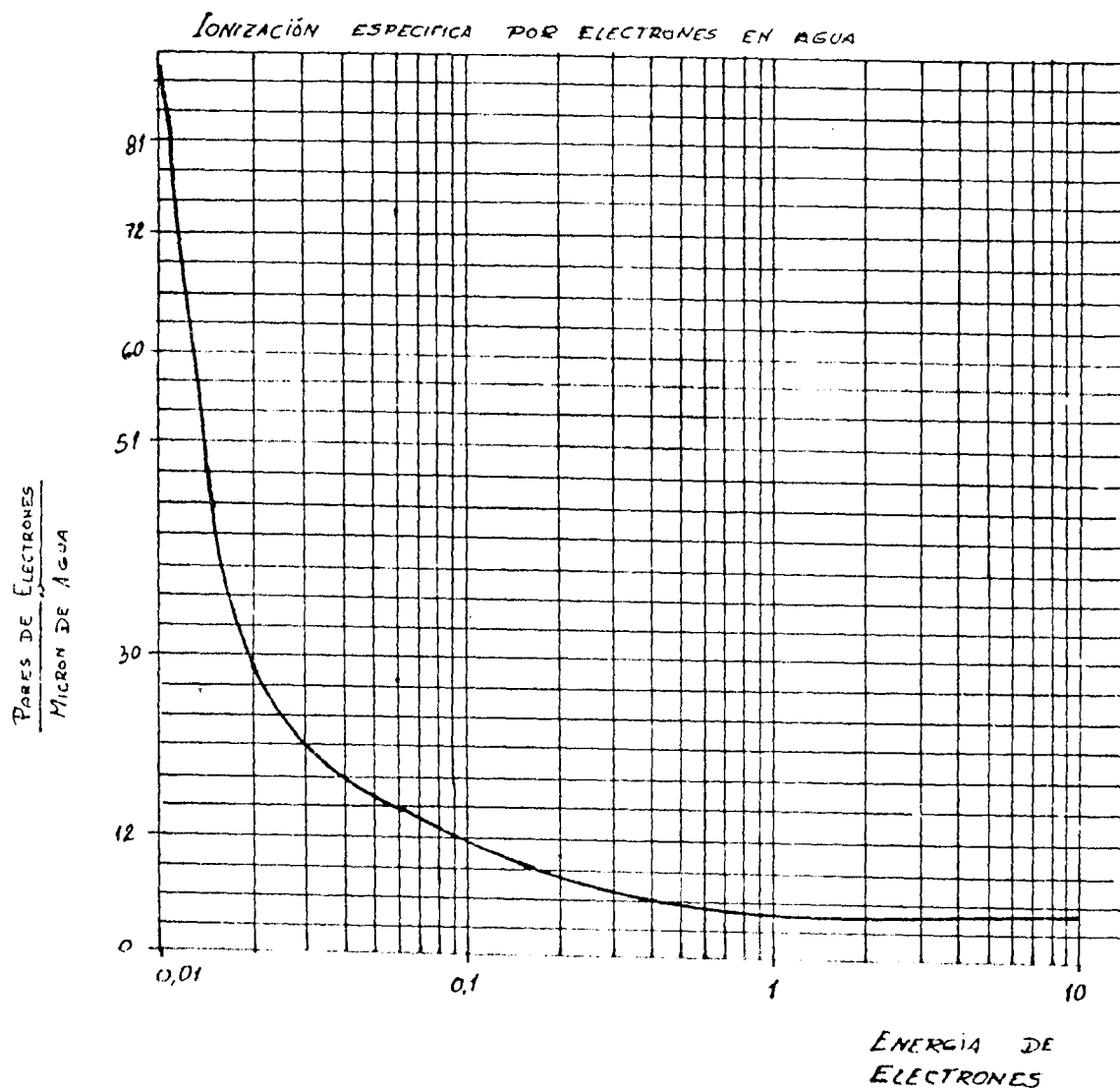
$$350 \text{ eV}/\mu \times 10.000 \mu/\text{cm} \times \text{betas}/\text{cm}^2 \times 1,6 \times 10^{-12} \text{ erg/eV} \times \sqrt{2} =$$

$$= 7,9 \times 10^{-6} \text{ erg/cm} \times \text{betas}/\text{cm}^2$$

y como la densidad de los tejidos blandos es muy cercana a 1 g/cm^3 , y el número de partículas beta entrantes en el tejido es $1/2$ del emitido, la dosis resulta:

$$\text{Dosis } \frac{1}{2} \text{ Acta} / \text{cm}^2 \times 1,9 \times 10^{-6} \text{ erg/cm} \times 1 \text{ g/cm}^3 \times 100 \text{ erg/g. Rad.}$$

En la gran mayoría de los casos, vestimenta standard, guantes, y lentes adecuados, son suficientes para prevenir una exposición individual. En efecto, la densidad y espesor normales de los implementos señalados, aseguran blindaje efectivo a partículas beta en un amplísimo rango de energías.



2.3.- Partículas Alfa:

En el caso de partículas alfa, por último, se deshechan las dosis debidas a irradiaciones externa, ya que la doble carga positiva, unida a su gran masa (comparada a la de los electrones)

le imprimen una elevadísima ionización específica, por lo que éstas partículas cederán toda su energía en cortísimas distancias.

Se considera que la dosis en la capa radiosensitiva, ubicada debajo de la epidermis y a unos 70 micrones, como ya se indicó, es cero para partículas con energías menores a 7 meV.