



El núcleo y sus radiaciones

clase 12

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas - UNLP
Instituto de Física La Plata - CONICET
Calle 49 y 115 La Plata





Dosimetría. Irradiación interna.

En las clases anteriores estudiamos el problema de la exposición de trabajadores del área de la Medicina Nuclear (y la industria nuclear en general) y la dosis a la que esta expuesta la población tanto por causas naturales como por fuentes antropogénicas.

Esta clase trata con la dosis de radiación recibido por pacientes sometidos a procedimientos de Medicina Nuclear.

La absorción de energía de la radiación ionizante puede causar daño a los tejidos vivos. En radioterapia se «saca ventaja» de, ya que se emplea el daño producido por la radiación para «atacar» células malignas

Limitación para las aplicaciones de diagnóstico debido al peligro potencial para el paciente.

En cualquier caso, es necesario analizar la distribución de energía en el cuerpo y cada tejido en forma cuantitativamente para garantizar una prescripción terapéutica precisa o para evaluar potenciales riesgos.



Dosimetría. Irradiación interna.

Uno de los factores más importantes en la evaluación de los efectos de la radiación sobre un órgano es la cantidad de energía depositada por la radiación en dicho órgano.

El cálculo de la energía depositada por un dado radionucleido en el interior del cuerpo es el campo de la dosimetría interna.

Dos métodos generales para realizar estos cálculos:

- **El método clásico.** Más simple.
- **Método de fracción absorbida (MIRD, Medical Internal Radiation Dose method).** Más versátil y preciso.

Por esto el método MIRD ha ganado amplia aceptación como el método estándar para el cálculo de valores dosimétricos internos.

Estudiaremos entonces los procedimientos generales a seguir en el uso del método MIRD.

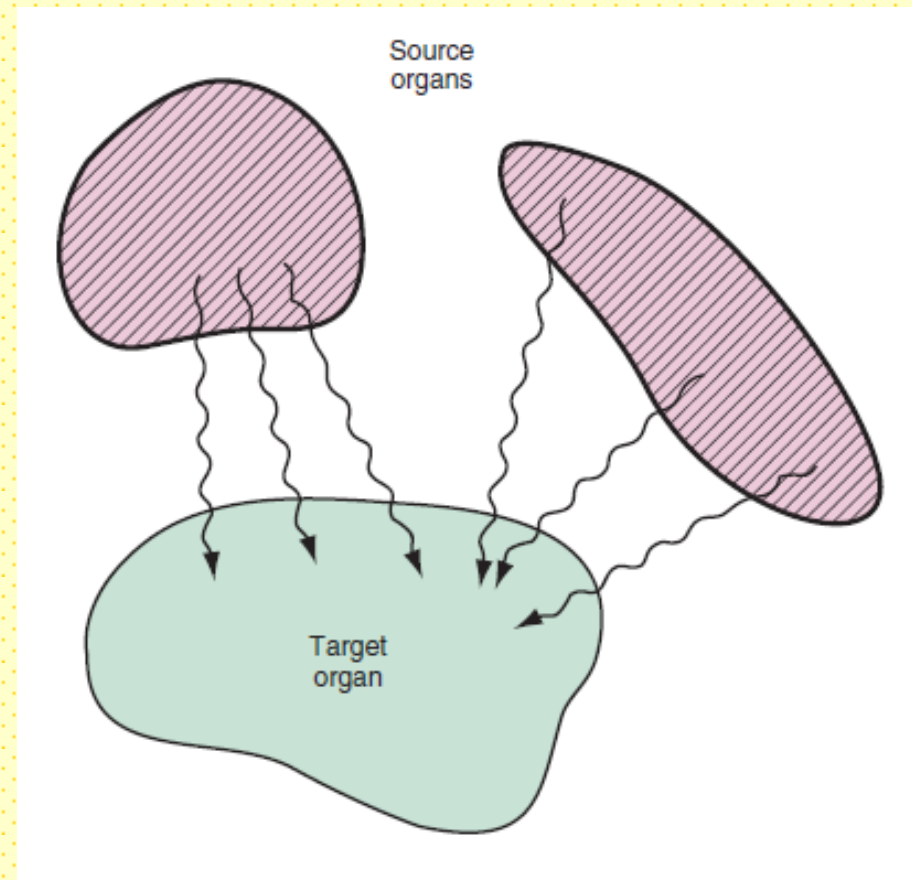
Cálculo de dosis. El método MIRD.

Esquema básico y problemas a resolver.

El método MIRD permite calcular la dosis de radiación absorbida por un órgano blanco originada por la radioactividad depositada en uno o más órganos del cuerpo

El órgano y el órgano blanco pueden ser el mismo. De hecho, en general la contribución más importante a la dosis recibida por un órgano proviene de la radioactividad contenida dentro del mismo órgano.

Uno o varios órganos se consideran fuente si contienen concentraciones de radioactividad que exceden la concentración promedio en el cuerpo





Cálculo de dosis. El método MIRD.

El procedimiento general para calcular la dosis de radiación entregada a un órgano blanco por un órgano fuente es un proceso de tres pasos:

1. Determinar la a cantidad de actividad y tiempo de permanencia de la misma en el órgano fuente (a mayor actividad y más largo tiempo de permanencia, mayor será la dosis).

Quizás el más problemático.

2. Determinar la energía total emitida por la radioactividad en el órgano fuente.
Depende de la energía de cada emisión y el número de desintegraciones.

Implica conocer las características físicas del o los radionucleidos administrados. Estas características
Habitualmente son bien conocidas.

3. Determinar la fracción de energía emitida por el órgano fuente absorbido por el blanco.
Depende de la absorción de los tejidos, que depende del tipo y energía de las emisiones y la relaciones anatómicas de los órganos fuente y blanco (tamaño, forma, separación).

Implica conocer la anatomía del paciente, la cual puede variar mucho de caso en caso.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Dificultados con el paso 1.

Los datos sobre la distribución de radiofármacos disponibles usualmente se obtiene de estudios en un pequeño número de sujetos humanos o animales.

Hay variaciones en el metabolismo y distribución. de radionucleidos entre pacientes y en función del estadio de la enfermedad.

La distribución de la radioactividad un órgano puede ser no homogénea, lo que lleva a incertidumbres adicionales en el cálculo de la especificación de dosis y el cálculo de la misma



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Debido a estas complicaciones y el gran número de variables involucradas, los cálculos de dosis de radiación se realizan en el marco de modelos anatómicos que incorporan dimensiones y formas anatómicas promedio.

La dosis de radiación que se calculan son entonces o valores medios para cada órgano en este modelo anatómico.

Excepción: cálculo de la dosis superficial en un órgano de por la actividad contenida en ese órgano.

Ejemplo: dosis absorbida por la pared de la vejiga resultante de actividad contenida en la misma vejiga.

En estos casos se considera que el valor medio la dosis media en el órgano.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Más allá de que tan refinado sea el modelo matemático utilizado en el para el cálculo de dosis en el marco del MIRD, los resultados obtenidos son sólo estimaciones del valor medio de la dosis.

Por lo tanto, deben ser utilizados únicamente como guía en la evaluación de los potenciales efectos de la radiación en un paciente.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Paso 1: cálculo de la actividad acumulada (\tilde{A}).

La dosis de radiación "trasmitida" a n órgano blanco depende en primer lugar de la actividad presente en el órgano fuente y el tiempo de permanencia de la actividad en dicho órgano.

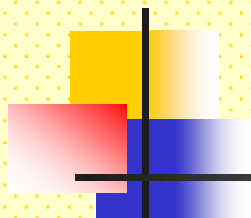
El producto tiempo.actividad es la **actividad acumulada \tilde{A}** .

Unidades: Bq.s

\tilde{A} es básicamente el número de desintegraciones que tienen lugar durante el tiempo de permanencia de la radiactividad en el órgano fuente.
La dosis entregada a otro órgano es proporcional a \tilde{A} .

Cada radionucleido tiene su propia distribución espacial y temporal en el cuerpo, determinadas por los procesos de incorporación, metabolismo, depuración y excreción y decaimiento físico del radionúclido.

Cálculo de dosis. El método MIRD.



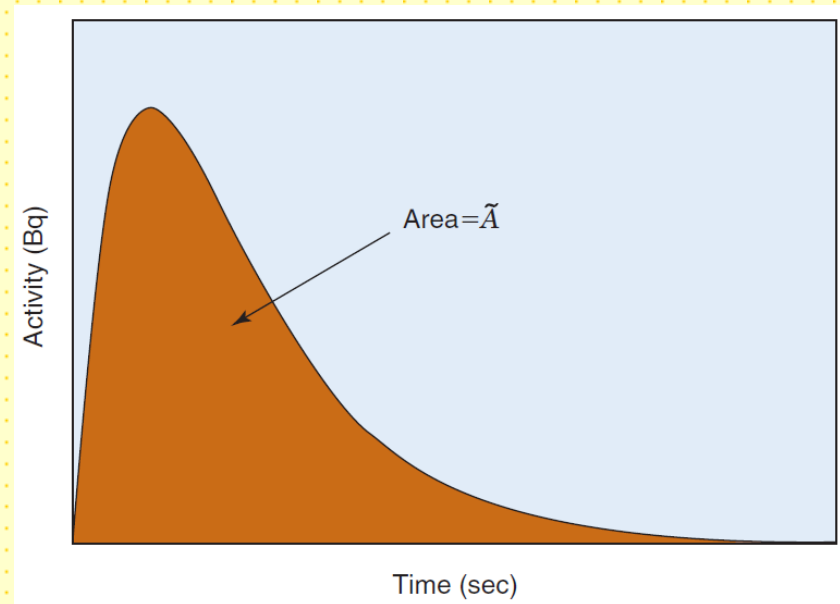
Si la curva de actividad del radionucleido en un dado órgano es conocida, \tilde{A} se obtiene a partir de:

$$\tilde{A} \approx \int_0^{\infty} A(t) dt$$

Donde se ha asumido que la actividad se incorpora en $t=0$ y la medida se continua hasta la completa desaparición del radionucleido ($t=\infty$).

Notar que hay entonces tres tiempos (o grupos de tiempos) característicos:

- Tiempo de incorporación.
- Vida media biológica (tiempo de eliminación).
- Vida media física.





Cálculo de dosis. El método MIRD.

Para estimar la dosis de radiación recibida de un radiotrazador particular se requiere tener la curva actividad-tiempo para todos los órganos principales.

Se pueden obtener a partir de:

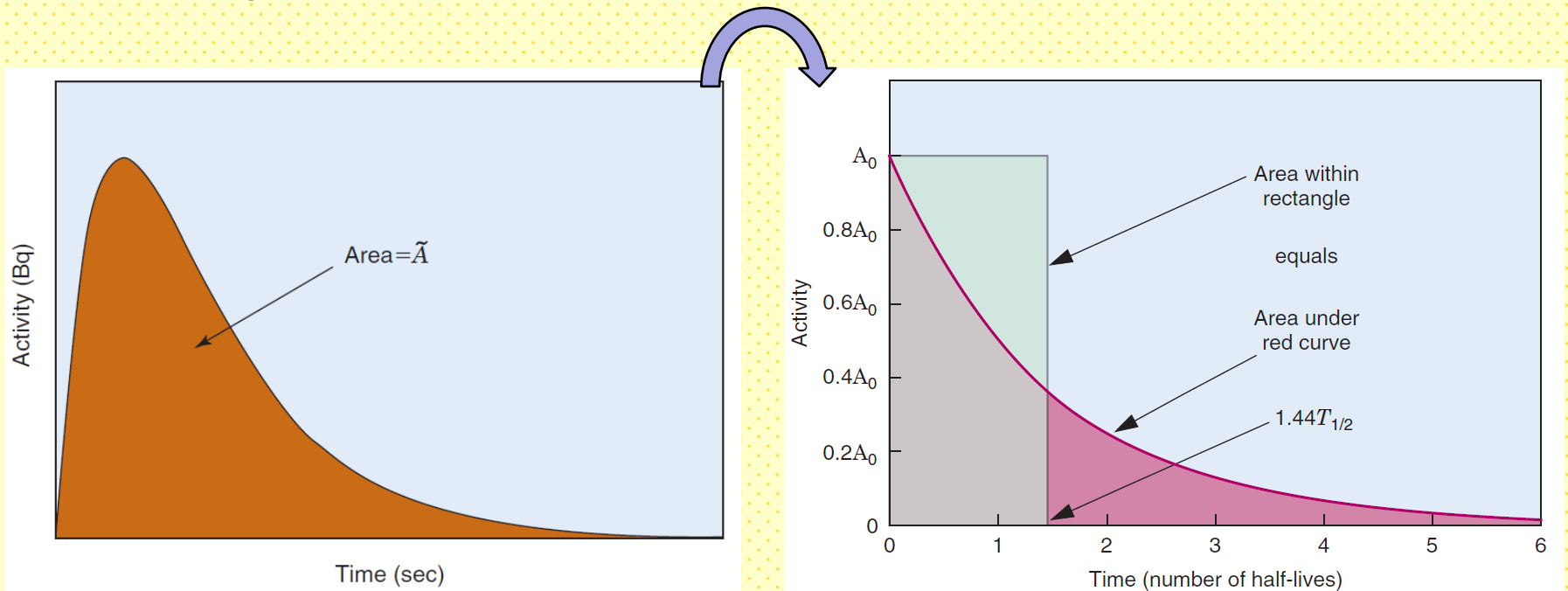
- Estudios en animales (que luego son extrapolados, con cierta incerteza al humano).
- Estudios mediante imágenes en humanos
- Conocimiento previo de la cinética del trazador
- Combinación de estos enfoques.

Las curvas actividad-tiempo pueden ser muy complejas, por lo cual evaluar la integral puede ser una tarea compleja.

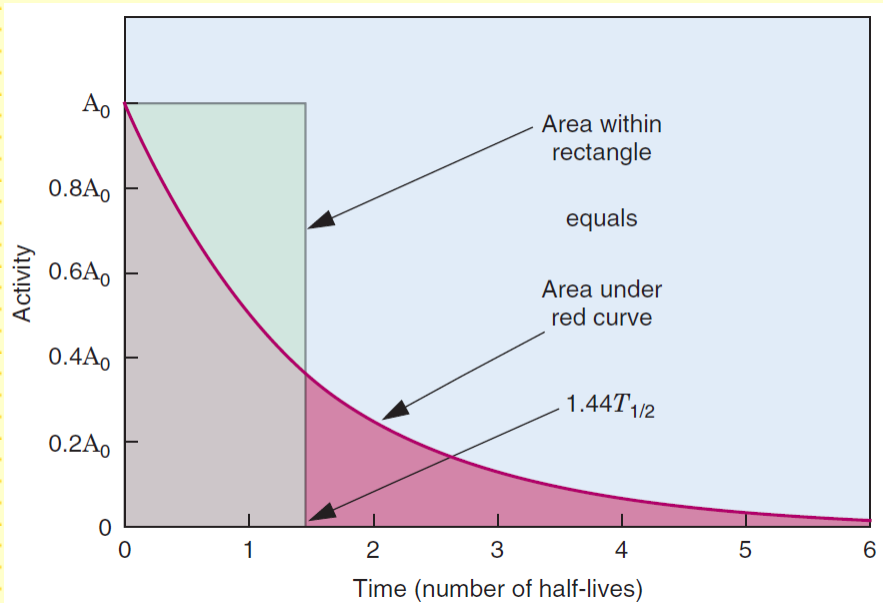
Suposiciones para simplificar el cálculo.

Cálculo de dosis. El método MIRD.

Situación 1: La incorporación del radiotrazador por el órgano fuente es "instantánea" (tiempo de incorporación muy corto con respecto a la vida media del radionúclido). No hay excreción biológica.



Cálculo de dosis. El método MIRD.



$$A(t) = A_0 e^{-0.693t/T_p}$$
$$\tilde{A} \approx A_0 \int_0^{\infty} e^{-0.693t/T_p} dt$$
$$= \frac{T_p A_0}{0.693} = 1.44 T_p A_0$$

La actividad acumulada por un radionucleido en un órgano fuente cuando se elimina SÓLO por decaimiento físico es lo mismo que si la actividad estuviera presente en un nivel constante A_0 durante un tiempo igual al semivida del radionúclido.

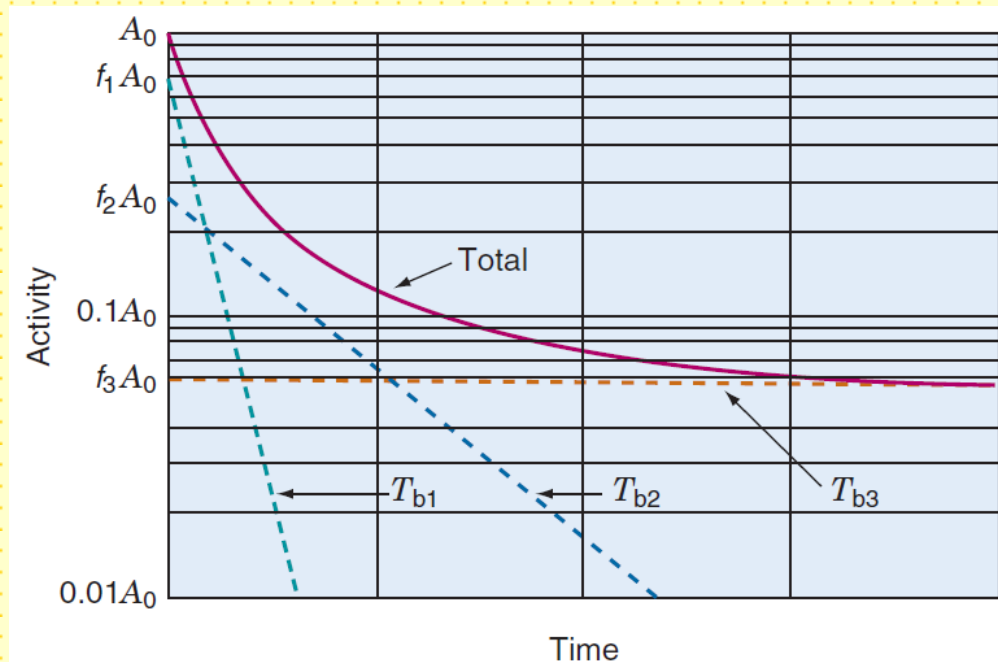
Cálculo de dosis. El método MIRD.

Situación 2: la incorporación es instantánea y la eliminación es SÓLO por excreción biológica (vida media física muy larga en comparación con la excreción biológica).

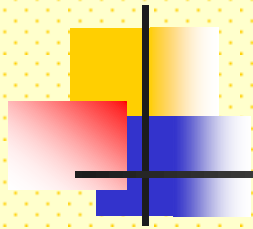
La excreción biológica debe ser cuidadosamente analizado. Con frecuencia, puede ser descrita por un conjunto componentes exponenciales.

Una fracción f_1 de la actividad inicial A_0 se excreta con una vida media biológica T_{b1} , una fracción f_2 con vida media T_{b2} , etc.

$$\begin{aligned}\tilde{A} &\approx A_0 \int_0^{\infty} f_1 e^{-0.693t/T_{b1}} dt \\ &+ A_0 \int_0^{\infty} f_2 e^{-0.693t/T_{b2}} dt + \dots \\ &= 1.44T_{b1}f_1A_0 + 1.44T_{b2}f_2A_0 + \dots\end{aligned}$$



Cálculo de dosis. El método MIRD.



Situación 3: la incorporación es instantánea y la eliminación se produce tanto por excreción biológica como por decaimiento radiactivo.

Vida media biológica caracterizada por una vida media T_b y el decaimiento radioactivo caracterizado por una vida media T_p .

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

Es similar al caso de un radionucleido que tiene por posibles decaimientos (branching).

$$T_e = \frac{T_p T_b}{(T_p + T_b)}$$

$$\tilde{A} \approx 1.44 T_e A_0$$

Si hay más de un componente para la excreción biológica se obtiene a partir de las componentes la media efectiva y luego \tilde{A} se calcula con sustituyendo la vida media biológica por la vida media biológica efectiva.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Situación 4: la incorporación no es instantánea y la eliminación se produce tanto por excreción biológica como por decaimiento radiactivo.

El tiempo de incorporación es comparable al decaimiento radiactivo, por lo cual la actividad del radiofármaco disminuye mientras el mismo se está incorporando al órgano fuente.

En general, la incorporación se puede describir por:

Tiempo característico (vida media) de incorporación.

$$A(t) = A_0(1 - e^{-0.693t/T_u})$$

$$\tilde{A} \approx 1.44A_0T_e(T_{ue} / T_u)$$

$$T_{ue} = \frac{T_u T_p}{T_u + T_p}$$



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Paso 2: constante de Dosis Absorbida de equilibrio Δ

Obtenida \tilde{A} para un dado órgano fuente el siguiente paso es calcular la energía emitida por la actividad acumulada.

La energía emitida por unidad de actividad acumulada viene dada por la constante de dosis absorbida de equilibrio Δ .

Δ debe calcularse para cada emisión del radionucleido en consideración. Viene dada por:

$$\Delta_i = 1.6 \times 10^{-13} N_i E_i \text{ (Gy} \cdot \text{kg / Bq} \cdot \text{sec)}$$

Cálculo de dosis. El método MIRD.

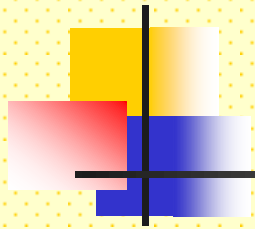
Probabilidad de emisión.

$$\Delta_i = 1.6 \times 10^{-13} N_i E_i (\text{Gy} \cdot \text{kg} / \text{Bq} \cdot \text{sec})$$

Energía en MeV de la i-ésima emisión.

El producto de la actividad acumulada \tilde{A} y la constante de dosis de equilibrio absorbida Δ_i es la energía emitida por la emisión i en Gy.kg durante el tiempo de permanencia de la radiactividad en el órgano fuente.

Cálculo de dosis. El método MIRD.



Veamos un ejemplo de aplicación.

Un gas radiactivo de vida media de 20 se inyecta en una solución intravenosa. Aparece en los pulmones con un tiempo de medio de incorporación de 30 s y se excreta por exhalación con una vida media biológica de 10 s ¿Cuál es la actividad acumulada en los pulmones para una inyección de 250 MBq?

Si el radionucleido decae por emisión β (100%) con $E_{\beta}=0.3$ MeV. Luego del decaimiento β el radionucleido hijo se desexcita emitiendo un rayo γ de 0.2 MeV (80%) y conversión interna (20%) con energía de 0.195 MeV y un rayo X característico de 0.005 MeV.

Determinar la constante de dosis de equilibrio absorbida Δ_i para cada emisión.

Determinar la energía emitida en los pulmones.

Cálculo de dosis. El método MIRD.

1. Cálculo de \tilde{A} .

$$\tilde{A} \approx 1.44 A_0 T_e (T_{ue} / T_u)$$

$$T_{ue} = \frac{T_u T_p}{T_u + T_p}$$

$$T_{ue} = 20 \times 30 / (20 + 30) = 12 \text{ sec}$$

$$T_e = \frac{T_p T_b}{(T_p + T_b)}$$

$$T_e = 20 \times 10 / (20 + 10) = 6.7 \text{ sec}$$

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= 1.44 \times 250 \text{ MBq} \times 6.7 \text{ sec} \\ &\quad \times (12 \text{ sec} / 30 \text{ sec}) \\ &= 964.8 \text{ MBq} \cdot \text{sec} \end{aligned}$$

2. Cálculo de Δ_j .

Emisión β (100%), $E_\beta = 0.3 \text{ MeV}$.

Rayo γ de 0.2 MeV (80%).

Conversión interna (20%) $E = 0.195 \text{ MeV}$.

Rayo X característico de 0.005 MeV .

$$\begin{aligned} \Delta_\beta &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 1.0 \times 0.30 \\ &= 4.80 \times 10^{-14} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_\gamma &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 0.80 \times 0.20 \\ &= 2.56 \times 10^{-14} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_e &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 0.20 \times 0.195 \\ &= 6.24 \times 10^{-15} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_x &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 0.2 \times 0.005 \\ &= 1.60 \times 10^{-16} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec} \end{aligned}$$

Cálculo de dosis. El método MIRD.

3. Cálculo de la energía emitida.

$$\begin{aligned}\Delta &= \Delta_{\beta} + \Delta_{\gamma} + \Delta_e + \Delta_x \\ &= 8.0 \times 10^{-14} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec} \\ &= 8.0 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{kg/MBq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{A} \times \Delta &= 9.65 \times 10^2 \text{ MBq} \cdot \text{sec} \times 8.0 \\ &\quad \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{kg/MBq} \cdot \text{sec} \\ &= 7.72 \times 10^{-5} \text{ Gy} \cdot \text{kg} \\ &= 7.72 \times 10^{-5} \text{ joules}\end{aligned}$$



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Paso 3: fracción absorbida por el órgano blanco.

El paso final es determinar la fracción de la energía emitida por el órgano fuente que es absorbido por el órgano blanco.

Esta fracción queda determinada por el coeficiente ϕ , la fracción absorbida.

La fracción absorbida depende de:

- blanco La cantidad de energía que llega al órgano blanco. Depende de la atenuación por el tejido que separa los órganos fuente y blanco.
- Volumen y composición del órgano blanco.

Por lo tanto, depende del tipo de partícula emitida por el órgano fuente y su energía y la relación anatómica del par órgano fuente-órgano blanco,.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

En un cálculo de dosimetría el valor de ϕ debe ser determinado para cada tipo de emisión del radionúclido y para cada par de órganos fuente y blanco.

Notación: $\phi_i(r_k \leftarrow r_h)$ indica la fracción de energía entregada por un órgano fuente (o región), r_h , a un órgano blanco, r_k , para cada emisión i del radionúclido.

Dosis absorbida promedio (en Gy):

$$\bar{D}(r_k \leftarrow r_h) = \frac{\tilde{A}}{m_t} \sum_i \phi_i(r_k \leftarrow r_h) \Delta_i$$

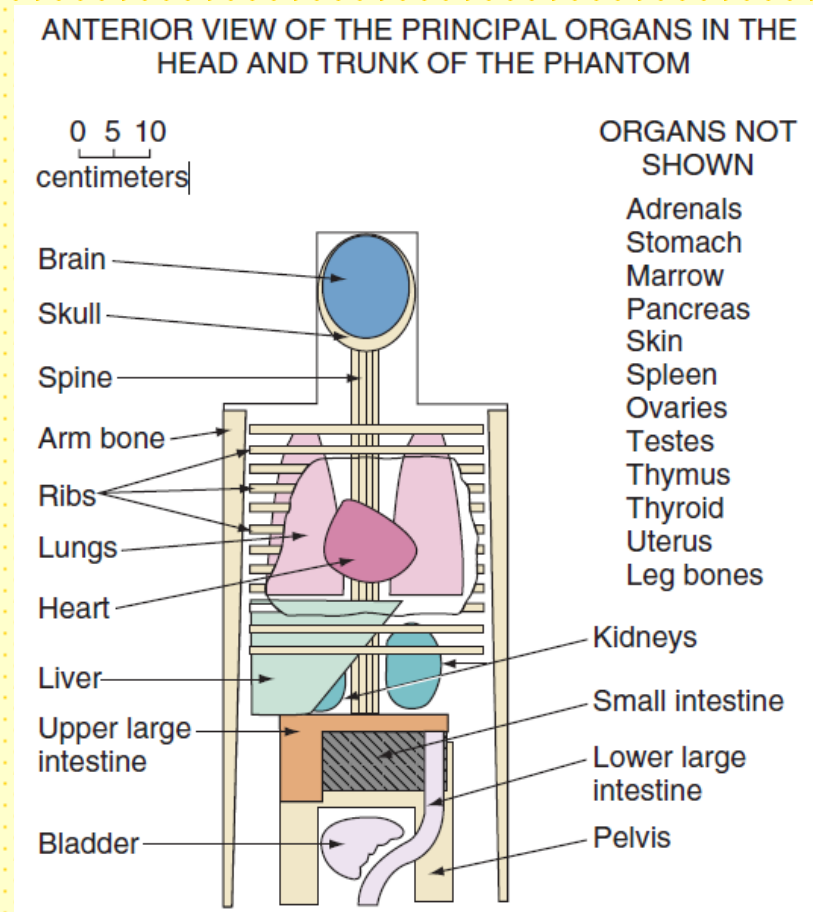
La suma se extiende sobre cada par de órganos y emisiones.

Cálculo de dosis. El método MIRD.

Valores de ϕ se han obtenido de modelos matemáticos que incorporan órganos y estructuras anatómicas de tamaño y forma promedio

El modelo ha sido publicado por años por el Comité MIRD de la Sociedad de Medicina Nuclear. Cristy y Eckerman desarrollaron una serie de modelos que representan recién nacidos, niños de un año, 5, 10 y 15 años y adultos.

Stabin y colaboradores extendieron el modelo a mujeres y embarazadas.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Organ	Mass (g)	Organ	Mass (g)
Adrenals	16.3	Lungs	1000
Brain	1420	Ovaries	8.71
Breasts (excluding skin)	351	Pancreas	94.3
Gallbladder contents	55.7	Skeleton	
Gallbladder wall	10.5	Active marrow	1120
Gastrointestinal Tract		Cortical bone	4000
Lower large intestine contents	143	Trabecular bone	1000
Lower large intestine wall	167	Skin	3010
Small intestine contents and wall	1100	Spleen	183
Stomach contents	260	Testes	39.1
Stomach wall	158	Thymus	20.9
Upper large intestine contents	232	Thyroid	20.7
Upper large intestine wall	220	Urinary bladder contents	211
Heart contents	454	Urinary bladder wall	47.6
Heart wall	316	Uterus	79.0
Kidneys	299	Remaining tissue	51,800
Liver	1910		

From Cristy M, Eckerman K: *Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages From Internal Photon Sources (ORNL Report ORNL/TM-8381 V1-V7)*. Oak Ridge, TN, 1987, Oak Ridge National Laboratory.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Los cálculos de ϕ son complejos y dan lugar a tablas muy extensas, sobre todo para el caso de radiaciones penetrantes (fotones con $E > 10$ keV) debido a la dependencia con la energía de la radiación de los procesos de atenuación y absorción.

La situación es más sencilla para las radiaciones no penetrantes (β , rayos γ y X con $E < 10$ keV).

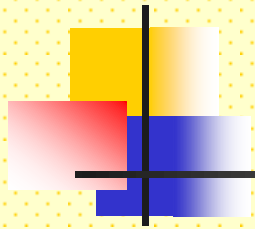
Se puede asumir que toda la energía emitida es "absorbida localmente", es decir, dentro del propio órgano fuente.

En esta situación:

$\phi = 1$ cuando el órgano fuente y el órgano blanco son el mismo órgano.

$\phi = 0$ órgano fuente distinto del órgano blanco.

Cálculo de dosis. El método MIRD.



Volvamos al ejemplo del gas radiactivo antes discutido

Un gas radiactivo de vida media de 20 se inyecta en una solución intravenosa. Aparece en los pulmones con un tiempo de medio de incorporación de 30 s y se excreta por exhalación con una vida media biológica de 10 s ¿Cuál es la actividad acumulada en los pulmones para una inyección de 250 MBq?

Si el radionucleido decae por emisión β (100%) con $E_{\beta}=0.3$ MeV. Luego del decaimiento β el radionucleido hijo de desexcita emitiendo un rayo γ de 0.2 MeV (80%) y conversión interna (20%) con energía de 0.195 MeV y un rayo X característico de 0.005 MeV.

Determinar la constante de dosis de equilibrio absorbida Δ_i para cada emisión.

Determinar la energía emitida en los pulmones.

Cálculo de dosis. El método MIRD.

Emisión β (100%), $E_{\beta}=0.3$ MeV.

Rayo γ de 0.2 MeV (80%).

Conversión interna (20%) $E=0.195$ MeV.

Rayo X característico de 0.005 MeV.

$$\begin{aligned}\tilde{A} &= 1.44 \times 250 \text{ MBq} \times 6.7 \text{ sec} \\ &\quad \times (12 \text{ sec}/30 \text{ sec}) \\ &= 964.8 \text{ MBq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

$$\bar{D}(r_k \leftarrow r_h) = \frac{\tilde{A}}{m_t} \sum_i \phi_i(r_k \leftarrow r_h) \Delta_i$$

Masa del pulmón: 1 kg (ver tabla)

$$\begin{aligned}\Delta_{\beta} &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 1.0 \times 0.30 \\ &= 4.80 \times 10^{-14} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\gamma} &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 0.80 \times 0.20 \\ &= 2.56 \times 10^{-14} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

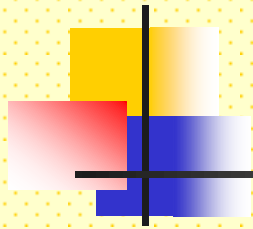
$$\begin{aligned}\Delta_e &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 0.20 \times 0.195 \\ &= 6.24 \times 10^{-15} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_x &= (1.6 \times 10^{-13}) \times 0.2 \times 0.005 \\ &= 1.60 \times 10^{-16} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

$$\Delta_{nn} = 5.44 \times 10^{-14} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec}$$

$$\begin{aligned}\bar{D} &= (9.65 \times 10^8 \text{ Bq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (5.44 \times 10^{-14} \text{ Gy} \cdot \text{kg/Bq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (\phi = 1)/1 \text{ kg} \\ &= 5.25 \times 10^{-5} \text{ Gy} \text{ (5.25 mrad)}\end{aligned}$$

Cálculo de dosis. El método MIRD.



La dosis específica absorbida se define:

$$\Phi = \frac{\phi}{m_t}$$

Es la fracción de energía emitida por el órgano fuente que es absorbida por gramo de órgano blanco.

La dosis absorbida se escribe entonces:

$$\bar{D}(r_k \leftarrow r_h) = \tilde{A} \sum_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \Delta_i$$

Teorema de reciprocidad:

$$\Phi_i(r_k \leftarrow r_h) = \Phi_i(r_h \leftarrow r_k)$$

La dosis absorbida por gramo es la misma si se intercambian los órganos fuente y blanco.

Cálculo de dosis. El método MIRD.

Los cálculos de dosis de radiación para radiación penetración son complejos y tediosas, especialmente cuando hay que considerar múltiples emisiones.

El problema ha sido simplificado por la introducción del factor de dosis S (también llamado DF), la dosis media por unidad de actividad acumulada.

$$\bar{D}(r_k \leftarrow r_h) = \tilde{A} \sum_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \Delta_i$$

Coeficientes que dependen de los órganos y las características físicas del radionucleido.

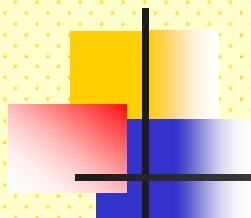
$$\begin{aligned} S(r_k \leftarrow r_h) &= \frac{1}{m_k} \sum_i \phi_i(r_k \leftarrow r_h) \Delta_i \\ &= \sum_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \Delta_i \end{aligned}$$

Unidades: Gy/(Bq.s).

Tabulados para la mayoría de los radionucleidos y pares de órganos de interés

$$\bar{D}(r_k \leftarrow r_h) = \tilde{A} \times S(r_k \leftarrow r_h)$$

Cálculo de dosis. El método MIRD.



Ejemplo de aplicación.

Calcular la dosis de radiación transmitida al hígado (LI) para un individuo adulto (hombre) promedio causada por una inyección un radiofármaco que contiene ^{99m}Tc y una actividad de 100 MBq. Asumir que el 60% de la actividad queda en el hígado, el 30% en el bazo (SP) y el 10% en la médula ósea (RM), con incorporación instantánea y despreciando la excreción biológica.

$$\begin{aligned}\tilde{A}_{\text{LI}} &= 1.44 \times 6.0 \text{ hr} \times 0.60 \times 100 \text{ MBq} \\ &= 518.4 \text{ MBq} \cdot \text{hr} \\ &= 1.87 \times 10^6 \text{ MBq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{A}_{\text{SP}} &= 1.44 \times 6.0 \text{ hr} \times 0.30 \times 100 \text{ MBq} \\ &= 259.2 \text{ MBq} \cdot \text{hr} \\ &= 9.33 \times 10^5 \text{ MBq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{A}_{\text{RM}} &= 1.44 \times 6.0 \text{ hr} \times 0.10 \times 100 \text{ MBq} \\ &= 86.4 \text{ MBq} \cdot \text{hr} \\ &= 3.11 \times 10^5 \text{ MBq} \cdot \text{sec}\end{aligned}$$

De tablas:

$$S(\text{LI} \leftarrow \text{LI}) = 3.16 \times 10^{-6} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}$$

$$S(\text{LI} \leftarrow \text{SP}) = 7.22 \times 10^{-8} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}$$

$$S(\text{LI} \leftarrow \text{RM}) = 8.96 \times 10^{-8} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}$$

$$\begin{aligned}\bar{D}(\text{LI} \leftarrow \text{LI}) &= (1.87 \times 10^6 \text{ MBq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (3.16 \times 10^{-6} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}) \\ &= 5.91 \text{ mGy}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{D}(\text{LI} \leftarrow \text{SP}) &= (9.33 \times 10^5 \text{ MBq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (7.22 \times 10^{-8} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}) \\ &= 6.74 \times 10^{-2} \text{ mGy}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{D}(\text{LI} \leftarrow \text{RM}) &= (3.11 \times 10^5 \text{ MBq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (8.96 \times 10^{-8} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}) \\ &= 2.79 \times 10^{-2} \text{ mGy}\end{aligned}$$

$$\bar{D} = 5.91 + 6.74 \times 10^{-2} + 2.79 \times 10^{-2} \text{ mGy}$$

Cálculo de dosis. El método MIRD.

$$\begin{aligned}\bar{D}(\text{LI} \leftarrow \text{LI}) &= (1.87 \times 10^6 \text{ MBq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (3.16 \times 10^{-6} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}) \\ &= 5.91 \text{ mGy}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{D}(\text{LI} \leftarrow \text{SP}) &= (9.33 \times 10^5 \text{ MBq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (7.22 \times 10^{-8} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}) \\ &= 6.74 \times 10^{-2} \text{ mGy}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{D}(\text{LI} \leftarrow \text{RM}) &= (3.11 \times 10^5 \text{ MBq} \cdot \text{sec}) \\ &\quad \times (8.96 \times 10^{-8} \text{ mGy/MBq} \cdot \text{sec}) \\ &= 2.79 \times 10^{-2} \text{ mGy}\end{aligned}$$

$$\bar{D} = 5.91 + 6.74 \times 10^{-2} + 2.79 \times 10^{-2} \text{ mGy}$$

Este problema demuestra que la mayoría de la dosis entregada a un órgano que concentra el radionúclido surge de la radiactividad en el propio órgano [$\bar{D}(\text{LI} \leftarrow \text{LI})$].



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Este ejemplo representa una situación simplificada, donde se consideran solo unos pocos órganos y las actividades acumuladas en cada órgano son relativamente fáciles de estimar.

En muchos casos los cálculos son más complejos, con muchos órganos involucrados y con curvas de tiempo-actividad complejas.

Para facilitar los cálculos de dosis, se han desarrollado programas de cálculo para los nucleidos más comúnmente empleados en Medicina Nuclear y a partir de información usando phantomas como los de Cristy y Eckerman o Stabin. Esto simplifica enormemente los cálculos de dosis, aunque aún es necesario tener información de la actividad acumulada para cada órgano y radiofármaco. .

También se dispone de bases de datos, como la del Oak Ridge Institute for Science and Education.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

La dosis total (o total para el cuerpo) es la energía total depositada en el cuerpo dividida por la masa total.

En términos del Factor S para todo el cuerpo (TB):

$$\bar{D}(\text{TB} \leftarrow \text{TB}) = \tilde{A} \times S(\text{TB} \leftarrow \text{TB})$$

Si bien este parámetro fue utilizado durante muchos años para evaluar los riesgos de diferentes procedimientos de la Medicina Nuclear, no tiene en cuenta la no uniformidad de la distribución de dosis en los órganos del cuerpo.

Por lo tanto, los procedimientos son cuestionables.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Con el objetivo de cuantificar la dosis interna no uniforme se introdujo la efectiva E por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

Esta magnitud fue aplicada inicialmente para estimar los riesgos y dosis recibidas por los radioterapeutas y luego extendida a la Medicina Nuclear clínica.

Para cuantificar los efectos de la distribución no uniforme de radiactividad en los órganos se incluyen factores de peso.

$$E = \sum_{\text{T}} w_{\text{T}} \times D_{\text{T}} \times w_{\text{R}} = \sum_{\text{T}} w_{\text{T}} \times H_{\text{T}}$$

Cálculo de dosis. El método MIRD.

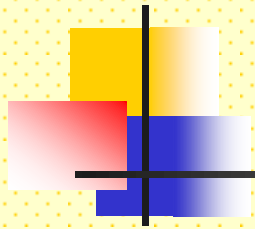
$$E = \sum_T w_T \times D_T \times w_R = \sum_T w_T \times H_T$$

La suma se extiende a todos los órganos.

Del orden de 1 para las radiaciones empleadas en Medicina Nuclear.

Aunque la dosis efectiva es considerada un mejor indicador de riesgo que D8TB) su relevancia para el cálculo de dosis y factor de riesgo esta en discusión y se debe tener cuidado en su uso e interpretación.

Cálculo de dosis. El método MIRD.



Limitaciones del Método MIRD

$$\bar{D}(r_k \leftarrow r_h) = \frac{\tilde{A}}{m_t} \sum_i \phi_i(r_k \leftarrow r_h) \Delta_i$$

Esta ecuación es básicamente correcta, pero los valores de ϕ están basados en modelos simplistas de la anatomía humana que asumen relaciones específicas en la forma, tamaño y ubicación de los órganos.

Modelos más realistas, basados en datos de imágenes médicas y modelos computacionales avanzados están en desarrollo para fines de dosimetría.

MIRD asume implícitamente que la actividad se distribuye uniformemente en cada órgano y que la energía se deposita uniformemente en el mismo.

Esto puede originar un error significativo en la dosis calculada para radiación no penetrante cuando la actividad se localiza en regiones específicas o tipos de células dentro de un órgano. Las concentraciones locales y, por tanto, la dosis absorbida pueden ser mucho más alto que los cálculos promedio de órganos podría sugerir.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

Limitaciones del Método MIRD

El cálculo de \tilde{A} es problemático.

Para el caso de un nuevo radiofármaco \tilde{A} debe ser determinada a partir de estudios en animales.

Puede haber diferencias significativas entre la cinética de un trazador en un modelo animal y en el humano.

Una vez que el radiofármaco ha sido aprobado para humanos, es posible obtener datos más directos humanos para estimar \tilde{A} . Sin embargo:

Los valores para sujetos sanos pueden diferir mucho de los correspondientes a enfermos o de un paciente a otro debido a efectos fisiopatológicos en la acumulación, metabolismo y excreción del radiofármaco.



Cálculo de dosis. El método MIRD.

A pesar de estas limitaciones, el método MIRD es una herramienta útil para comparar la dosis promedio para diversos órganos para una amplia variedad de procedimientos de la Medicina Nuclear.

Es una herramienta esencial en los proceso de aprobación de nuevos radiofármacos.

En circunstancias en el que los supuestos en los que se basa el enfoque MIRD son inaceptables, métodos más complejos y específicos deben ser usados. Por ejemplo, cálculos microdosimétricos (nivel celular) se deben realizar para radiofármacos que tienen una distribución no uniforme en órganos radiosensibles.

Estimaciones de dosis de radiación para aplicaciones terapéuticas pueden requerir la incorporación de datos adquiridos en el paciente particular.