

RADIACIONES IONIZANTES

DOSIMETRÍA

Bioq. Pedro Catania

INTRODUCCIÓN

El daño fisiológico producido por las radiaciones ionizantes en el organismo, se debe a la entrega de **energía** por parte de la radiación.

ACTIVIDAD

Cuando se utiliza una sustancia radiactiva como fuente de radiación, su actividad es igual al **número de desintegraciones radiactivas por segundo**.

La unidad S.I. es el **becquerel** y corresponde a 1 desintegración por segundo.

El **becquerel** es muy pequeño para ser usado como unidad en radiografía industrial. La unidad usada hasta ahora, el **curie** (Ci) es $3,7 \times 10^{10}$ veces mayor.

Las fuentes intensas se suelen medir en Ci, MBq o GBq.

La actividad cae exponencialmente en el tiempo.

CONSTANTE DE DESINTEGRACIÓN

Esta cantidad representa la **probabilidad por unidad de tiempo** de que ocurra una transformación nuclear para un radionucleido dado.

La constante de desintegración se mide por **segundo**.

Está relacionada con el período de semidesintegración ($T_{1/2}$) de un radionucleido por:

$$\lambda = \ln 2 / (T_{1/2})$$

$$\lambda = 0,693 / (T_{1/2})$$

PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN

Esta magnitud es la cantidad de **tiempo** necesario para que la **actividad** de una muestra de radionucleido **se reduzca a la mitad**.

Equivale al tiempo necesario para que un número dado de núcleos en un estado radiactivo dado se vea reducido a la mitad.

Su unidad fundamental es el segundo (s), pero se suele expresar en horas, días y años.

Para un radionucleido dado, el período de semidesintegración ($T_{1/2}$) está relacionado con la constante de desintegración (λ) por:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

$$T_{1/2} = 0,693 / \lambda$$

TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGÍA

Esta cantidad es la **energía** que una partícula cargada imparte a la materia por unidad de longitud a medida que la atraviesa.

La transferencia lineal de energía (**TLE**) se mide en $J m^{-1}$.

RADIODOSIMETRÍA

Se sabe que la radiación produce efectos deletéreos en un sistema viviente. Uno de los factores que más influyen en la aparición de estos efectos es la dosis de radiación.

CONCEPTO DE DOSIS

La dosis es una medida de la **energía absorbida** por parte de un medio expuesto a una radiación determinada.

DOSIS DE EXPOSICIÓN

Mide la ionización producida en el aire por una radiación.

La unidad **Roentgen (R)** fue definida como la radiación que en 1 cm³ de aire genera tantos iones como 1 UESq de carga de cada signo, en CNPT.

En la actualidad se utiliza la unidad correspondiente al S.I., que es el **Coulomb/kg**, por lo tanto 1 R equivale a $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb/kg de aire.

La potencia de un equipo de rayos X se evalúa en R/minuto medido a 1 metro de distancia (con frecuencia se abrevia: **Rmm**)

El roentgen es aplicable únicamente para exposición en aire de radiación electromagnética de menos de 2 Megaelectronvolts (MeV) y no es aplicable para partículas.

1 Roentgen = $1,61 \times 10^{15}$ pares de iones / kg de aire en CNPT
 1 Roentgen = $2,58 \times 10^{-4}$ Coulombs / kg de aire en CNPT
 1 Roentgen = 0,00869 Joules / kg de aire en CNPT

DOSIS DE ABSORCIÓN

Resulta del cociente entre la energía absorbida y la masa de la sustancia absorbente, de modo que se definió el **RAD** (*radiation absorbed dose*) como 100 ergios/g.

En el S.I. se utiliza el **Gray (Gy)** que equivale a 100 rads.

1 gray = 1 joule / kg
 1 rad = 0,01 joules / kg
 1 rad = 100 ergios / g

DOSIS EQUIVALENTE Y EFICACIA BIOLÓGICA RELATIVA

Como las radiaciones producen diferentes ionizaciones al atravesar un medio, un coeficiente que permite comparar dos tipos de radiaciones es la "*eficacia biológica relativa*" (**EBR**), también llamada "*factor de calidad*" (**Q**).

La **dosis equivalente surge de multiplicar la dosis absorbida por el EBR.**

La unidad de dosis equivalente es el **rem**, que es la cantidad de radiación que produce el mismo efecto que un **rad**:

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times \text{EBR}$$

rem proviene de las siglas en inglés **roentgen equivalent man**. De modo que a igual valor de dosis en rem se obtiene igual efecto biológico, de forma independiente de la naturaleza de la radiación.

En el S.I. el rem ha sido reemplazado por el **Sievert (Sv)**

1 Sv = 100 rem.
 1 Sv = 1 Gy x Q
 1 rem = 1 rad x Q

Factores de calidad

| Tipo de radiación | Q |
|--------------------|-----|
| Rayos X, Rayos γ | 1 |
| Electrones | 1 |
| Neutrones térmicos | 2,3 |
| Neutrones rápidos | 10 |
| Protones | 10 |
| Partículas α | 20 |

Resumen de unidades

| Concepto | Proceso físico | S.I. | Unidad antigua |
|-------------------|------------------------|------------|----------------|
| Actividad | Desintegración nuclear | Bq | Ci |
| Exposición | Ionización del aire | Coulomb/kg | R |
| Dosis absorbida | Energía depositada | Gy | Rad |
| Dosis equivalente | Efecto biológico | Sv | rem |

La física y los efectos de las **radiaciones** en los organismos vivos son tema de gran interés debido al valor de sus aplicaciones en el **diagnóstico** y la **terapéutica**, y a la importancia de sus **potenciales efectos deletéreos** en el profesional que trabaja con ellas.

Debe destacarse que más del **70%** de la exposición a radiaciones ionizantes a la que está expuesta la población en general proviene de **fuentes naturales, que no pueden ser evitadas**.

La mayoría de dichas fuentes naturales están en el aire, en los alimentos, en la corteza terrestre y en el espacio (rayos cósmicos).

La **radiobiología** es la rama de la biología que se encarga de estudiar, describir y explicar los efectos que la radiación ionizante tiene sobre los tejidos vivos.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los tejidos vivos pueden ser:

- microscópicos o macroscópicos,
- inmediatos o tardíos,
- locales y/o corporales,
- somáticos y/o hereditarios,
- estocásticos y/o deterministas

```

    graph TD
      A[Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes] -- pueden ser --> B[Estocásticos o probabilísticos]
      A -- pueden ser --> C[Deterministas]
  
```

La Comisión Internacional de Protección Radiológica define:

Efectos estocásticos como aquéllos para los cuales la probabilidad de que un efecto ocurra, más que su severidad, es función de la dosis, sin umbral.

Efectos deterministas como aquellos para los cuales la severidad del efecto varía con la dosis, siendo necesario un valor umbral.

```

    graph TD
      A[Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes] -- pueden ser --> B[Estocásticos o probabilísticos]
      A -- pueden ser --> C[Deterministas]
      B -- originados por --> D[Daño en ADN celular]
      C -- originados por --> E[Muerte celular y Necrosis de tejidos]
  
```

Los **efectos estocásticos** se pueden presentar tanto en el individuo expuesto (**efectos estocásticos somáticos**), como sería en caso de la carcinogénesis, como también en la descendencia (**efectos estocásticos hereditarios**).

Al igual que en la irradiación de células no germinales, las células germinales irradiadas pueden experimentar **efectos deterministas** (esterilidad).

```

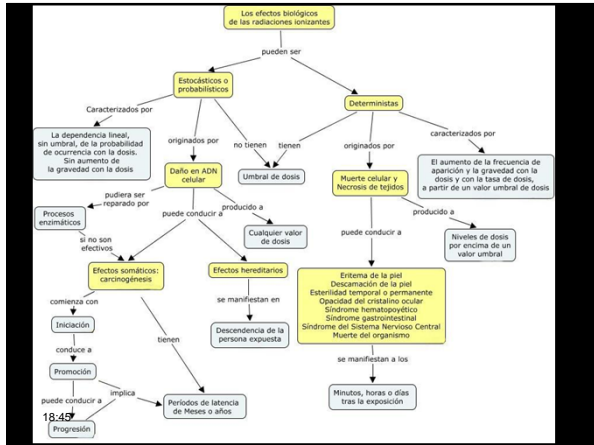
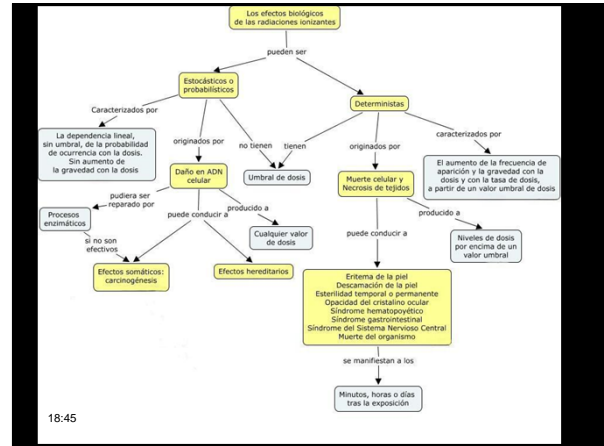
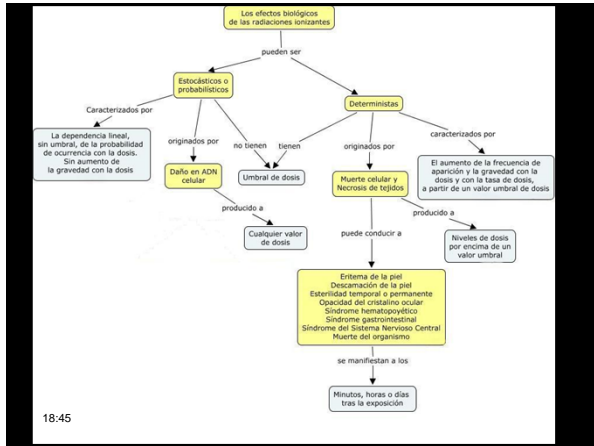
    graph TD
      A[Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes] -- pueden ser --> B[Estocásticos o probabilísticos]
      A -- pueden ser --> C[Deterministas]
      B -- Caracterizados por --> D[La dependencia lineal, sin umbral, de la probabilidad de ocurrencia con la dosis. Sin aumento de la gravedad con la dosis.]
      B -- originados por --> E[Daño en ADN celular]
      C -- originados por --> F[Muerte celular y Necrosis de tejidos]
      C -- caracterizados por --> G[El aumento de la frecuencia de aparición y la gravedad con la dosis y con la tasa de dosis, a partir de un valor umbral de dosis]
  
```

18:45

```

    graph TD
      A[Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes] -- pueden ser --> B[Estocásticos o probabilísticos]
      A -- pueden ser --> C[Deterministas]
      B -- Caracterizados por --> D[La dependencia lineal, sin umbral, de la probabilidad de ocurrencia con la dosis. Sin aumento de la gravedad con la dosis.]
      B -- originados por --> E[Daño en ADN celular]
      E -- no tienen --> F[Umbral de dosis]
      E -- tienen --> G[Umbral de dosis]
      C -- originados por --> H[Muerte celular y Necrosis de tejidos]
      C -- caracterizados por --> I[El aumento de la frecuencia de aparición y la gravedad con la dosis y con la tasa de dosis, a partir de un valor umbral de dosis]
      H -- producido a --> J[Cualquier valor de dosis]
      I -- producido a --> K[Niveles de dosis por encima de un valor umbral]
  
```

18:45



Efectos sobre el ADN.

Cualquier molécula de la célula puede ser alterada por la radiación, pero el ADN es el blanco biológico más crítico, debido a la información genética que contiene. Una dosis absorbida de **2 Gy** basta para originar centenares de lesiones en sus moléculas de ADN.

La mayoría de estas lesiones son reparables, pero las producidas por una radiación ionizante concentrada (por ejemplo, un protón o una partícula alfa) son en general menos reparables que las generadas por una radiación ionizante dispersada (por ejemplo, un rayo X o un rayo gamma).

Por lo tanto, las radiaciones ionizantes concentradas (alta TLE) tienen por lo común un mayor efecto biológico relativo (EBR) que las radiaciones ionizantes dispersadas (baja TLE) en casi todas las formas de lesión.

Efectos sobre los genes.

El daño del ADN que queda sin reparar o es mal reparado puede manifestarse en forma de **mutaciones**, cuya frecuencia parece aumentar como una **función lineal de la dosis**, sin umbral.

El hecho de que la tasa de mutaciones parezca ser proporcional a la dosis se considera indicativo de que una sola partícula ionizante que atraviese el ADN es suficiente, en principio, para causar una mutación.

Efectos sobre los cromosomas

Las lesiones por radiación del aparato genético pueden causar también **cambios en el número y la estructura de los cromosomas**, modificaciones cuya frecuencia se ha observado que **aumenta con la dosis** en trabajadores expuestos, en supervivientes de la bomba atómica y en otras personas expuestas a la radiación ionizante.

Efectos sobre la supervivencia celular

Entre las reacciones más tempranas a la irradiación figura la **inhibición de la división celular**, que aparece en seguida tras la exposición, aunque su grado y duración varían con la dosis.

Si bien la **inhibición de la mitosis es característicamente pasajera**, la lesión radiológica de genes y cromosomas puede ser letal para las células en división, que en conjunto son muy sensibles a la radiación.

Medida en términos de capacidad proliferativa, la supervivencia de las células en división tiende a disminuir exponencialmente con el aumento de la dosis, de manera que **12 Gy bastan por lo general para reducir la población superviviente en alrededor del 50 %**.

18:45

Efectos sobre los tejidos

Piel

Las células de la **capa germinal de la epidermis** son muy sensibles a la radiación. En consecuencia, la rápida exposición de la piel a una dosis de **6 Sv** o más provoca **eritema** de la zona expuesta, que aparece dentro del primer día, suele durar unas cuantas horas y va seguido al cabo de dos a cuatro semanas de una o más oleadas de un eritema más profundo y prolongado, así como de **pérdida de pelo**.

Si la dosis supera los **10 a 20 Sv**, en dos o cuatro semanas pueden surgir **ampollas, necrosis y ulceración**, seguidas de **fibrosis** de la dermis y los vasos subyacentes, que pueden desembocar en **atrofia** y una segunda oleada de ulceración meses o años después.

18:45

Médula ósea y tejido linfoide

Los **linfocitos** también son muy radiosensibles; una dosis de **2 a 3 Sv** irradiada en poco tiempo a todo el cuerpo puede destruir un número suficiente de ellos para que disminuya el recuento de linfocitos periféricos y la respuesta inmunitaria se deteriore en pocas horas.

Las **células hematopoyéticas** de la médula ósea tienen una sensibilidad similar a la radiación y su depleción con una dosis comparable es suficiente para causar **granulocitopenia y trombocitopenia** en las tres a cinco semanas siguientes.

Si la dosis es mayor, estas disminuciones del recuento de granulocitos y plaquetas pueden ser lo bastante graves para originar **hemorragia o una infección mortal**.

18:45

Intestino

Las **células progenitoras del epitelio** que reviste el **intestino delgado** también tienen **extraordinaria sensibilidad** a la radiación.

La exposición aguda a **10 Sv** disminuye su número en grado suficiente para causar la **denudación de las vellosidades intestinales** suprayacentes en unos días. La denudación de una superficie grande de la mucosa puede dar lugar a un síndrome fulminante similar a la **disentería** que causa rápidamente la **muerte**.

18:45

Gónadas

Los **espermatozoides maduros** pueden sobrevivir a dosis grandes (**100 Sv**), pero los **espermatogonios** son tan radiosensibles que una dosis de sólo **0,15 Sv** aplicada rápidamente a ambos testículos basta para causar **oligospermia**, y una dosis de **2 a 4 Sv** puede provocar **esterilidad permanente**.

También los **ovocitos** son radiosensibles. Una dosis rápida de **1,5 a 2,0 Sv** aplicada a ambos ovarios origina **esterilidad temporal**, y una dosis mayor, **esterilidad permanente**, en función de la edad de la mujer en el momento de la exposición.

18:45

Aparato respiratorio

El pulmón no es muy radiosensible, pero la exposición rápida a una dosis de **6 a 10 Sv** puede hacer que en la zona expuesta se desarrolle **neumonía aguda** en el plazo de uno a tres meses.

Si se afecta un volumen grande de tejido pulmonar, el proceso puede originar **insuficiencia respiratoria** al cabo de unas semanas, o conducir a **fibrosis pulmonar** en meses o años después.

18:45

Cristalino del ojo

Las células del epitelio anterior del cristalino, que continúan dividiéndose toda la vida, son relativamente **radiosensibles**.

El resultado es que una exposición rápida del cristalino a una dosis superior a **1 Sv** puede generar en unos meses la formación de una **opacidad polar posterior microscópica**; y **2 a 3 Sv** recibidos en una sola exposición breve pueden producir **cataratas** que dificulten la visión.

18:45

