

DOSIFICACION DE LOS RAYOS X

(Este trabajo resulta de una conferencia dictada sobre el tema por el doctor Roberto Restrepo, en el curso de cancerología, reconstruída por Luis M. Borrero).

(MEDIDAS DE INTENSIDAD)

Cuando se propone la aplicación terapéutica de un nuevo producto, se determinan siempre las dosis activa y tóxica, para poder suministrarlo en cantidades adecuadas que permitan obtener efectos benéficos, con exclusión de resultados peligrosos; la balanza es, pues, un instrumento absolutamente indispensable para la terapéutica.

El hallazgo de la terapia por las radiaciones, agentes eminentemente activos y, a más de ello, capaces de producir lesiones graves, puso sobre el tapete el problema de dosificarlos adecuadamente, con el fin de poder emplearlos como agentes curativos sin llegar nunca a producir manifestaciones necróticas; empero, se trataba de una radiación y es bien sabido que esta forma de energía es frecuentemente difícil de medir; en el caso concreto de los Rayos X era imposible hacer medidas directas de la intensidad de la radiación; sobre todo, era imposible hallar métodos de medición que pudieran ser fácilmente aplicados por los roentgenterapeutas; si las medidas directas de la radiación resultaban imposibles en la práctica, era preciso acudir a procedimientos indirectos, tratando de valorar la intensidad de la radiación por los efectos de la misma.

Los efectos de los Rayos X son de tres tipos diferentes:
Efectos químicos;

Efectos biológicos, y Efectos físicos.

Se procuró medir la intensidad de la radiación X por sus efectos químicos, y así nacieron los radiómetros de Holzkenecht y de Sabouraud-Noiré, entre otros, pero el hecho de que no resultaran suficientemente precisos hizo que se les abandonara posteriormente.

La acción biológica de los rayos Roentgen fue el fundamento de varios métodos de medida, entre los cuales el más notable fue el que la valoraba por medio de la "Dosis eritema cutáneo" que atendía a la "cantidad de radiación compatible con la integridad de la piel y que no produce en la cara del adulto sino una muy ligera reacción inflamatoria con depilación temporal" (Strohl), sin embargo, la piel tiene una radio-sensibilidad variable con el individuo, y en la apreciación del eritema interviene un factor personal imposible de controlar y nada despreciable; era preciso por lo tanto buscar un método más objetivo para medir la intensidad de los rayos.

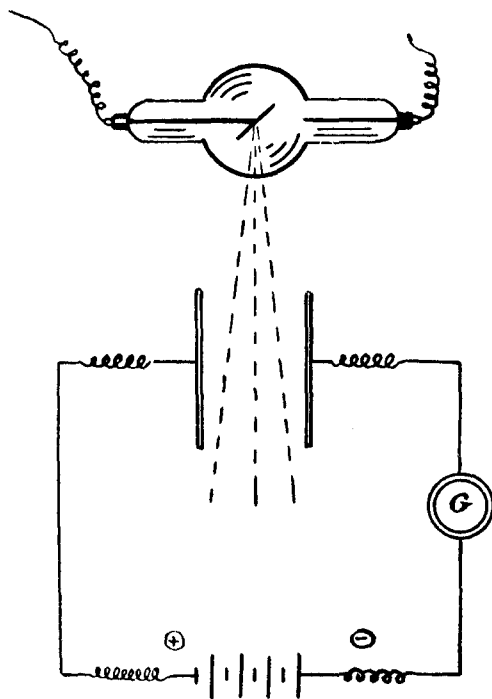
Pasando al campo de los efectos físicos, se pensó que la acción de los rayos sobre la placa fotográfica, la primera de sus actividades conocidas, podría medir la intensidad de la radiación; empero, por causas varias, el procedimiento resultó igualmente defectuoso, de manera que hoy sólo se acude al método ionométrico para determinarla.

Método ionométrico

No siendo posible la medida directa de la radiación, era preciso determinar su intensidad a través de uno de sus efectos, y más concretamente, de un efecto que fuera, a su vez, proporcional a la intensidad de la energía radiante; sin embargo, los efectos de los Rayos X como los de toda radiación, dependen de la cantidad de radiación absorbida, la cual es función de la intensidad y de la longitud de onda de los rayos; si esto parece dificultar y hasta imposibilitar las mediciones, no es cosa que interese desde el punto de vista de la roentgenerapia, porque los efectos biológicos son también función de la radiación absorbida únicamente. Por lo tanto, una medición de la cantidad de rayos absorbible será una medición indirecta de su efecto biológico; la ionización de los gases por la radiación roentgen es pro-

porcional a la dosis de rayos que se absorbe y sirve, por consiguiente, para los fines de la terapia por estas radiaciones.

a) *Ionización de los gases por los Rayos X*: En términos generales, un gas es mal conductor de la corriente eléctrica; si a una batería de acumuladores conectamos un circuito en el cual se han intercalado un galvanómetro y dos placas metálicas colocadas frente a frente y separadas por una determinada masa de aire (Fig. 1), hallaremos que el galvanómetro permanece



Esquema 1

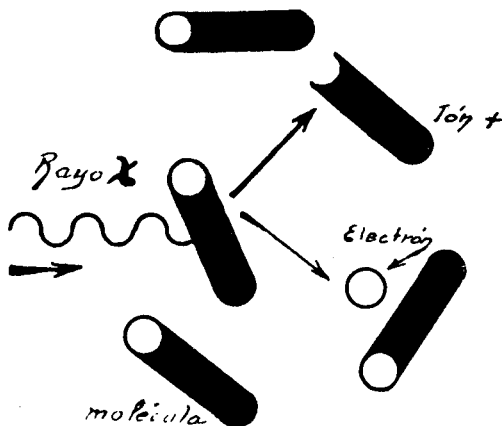
en cero, es decir, que la corriente no pasa a través del gas; pero si hacemos que un haz de Rayos X cruce a través del aire que separa las dos placas, el galvanómetro se desviará, indicando el paso de una corriente: los rayos han vuelto buen conductor un gas que lo era malo.

El hecho de que los gases se vuelvan conductores por la acción de los Rayos X, se explica fácilmente: esta radiación es capaz de producir una conmoción de tal magnitud en la molécula,

que ésta se rompe en fragmentos: por un lado electrones y por el otro moléculas que, habiendo perdido cargas eléctricas negativas, quedan cargadas positivamente; en el caso más sencillo, la escisión de la molécula por los Rayos X, da origen a un par de iones:

Un ión negativo que es en este caso un electrón rápido;

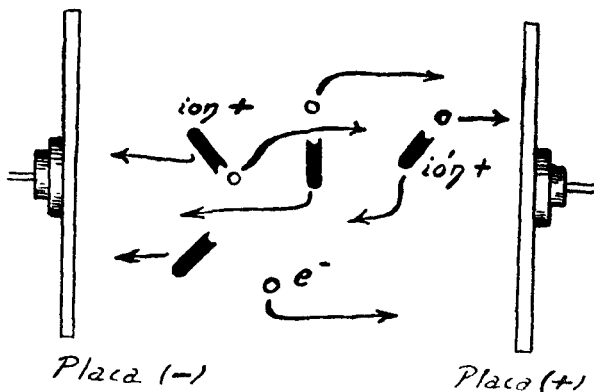
Un ión positivo que está formado por el resto de la molécula (ver esquema II).



Esquema II

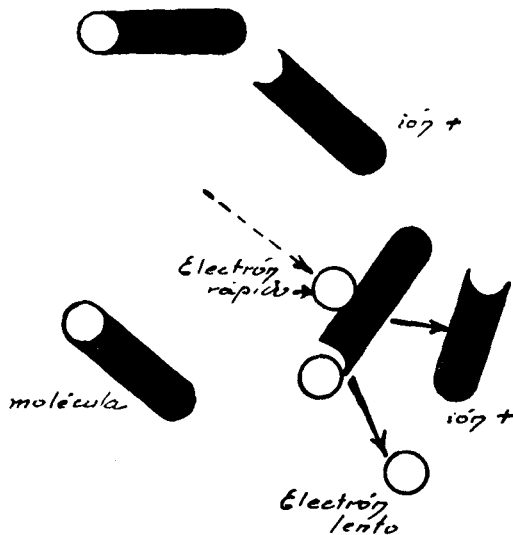
Los electrones arrancados a la molécula por la radiación de Roentgen, parten con una velocidad variable, porque han sido "impulsados" por los rayos, recibiendo de ellos una cierta energía cinética que emplean en destruir otra u otras moléculas, chocando contra ellas (Esquema III); agotada esa energía, cesa el avance de dichos electrones.

b) *Medida de la intensidad de la radiación por medio de la "cámara:"* Para romper una molécula se necesita una energía dependiente de la naturaleza de la molécula en cuestión y es la energía radiante absorbida de la que se verifica la ionización del gas: cuanto mayor sea la cantidad de Rayos X que se absorbe, mayor será el número de iones producido. Si se cuentan esos pares de iones se podrá valorar la energía absorbida por el gas, pero es preciso "recoger" rápidamente esos iones porque teniendo cargas opuestas tienden a combinarse nuevamente, hechando a perder los resultados de la medición.



Esquema III

La recombinación de los iones se impide haciendo que la ionización ocurra en el espacio comprendido entre dos placas conectadas a los polos de una batería suficientemente potente: los iones negativos (electrones en este caso) irán al polo positivo, mientras que los positivos se dirigirán al polo o placa negativa; se realiza en esa forma un “clivaje”, una verdadera electrolisis en los gases (Esquema IV).



Esquema IV

La placa que está recogiendo iones, recibe por eso mismo una carga que no es sino la suma de las cargas eléctricas individuales de los iones, por lo tanto, midiendo la cantidad de electricidad captada por la placa se podrá saber el número de iones producido y como cada molécula que se rompe da origen a un número igual de cargas positivas y negativas, bastará medir la carga recibida por una sola de las placas, para tener los datos necesarios para el cálculo.

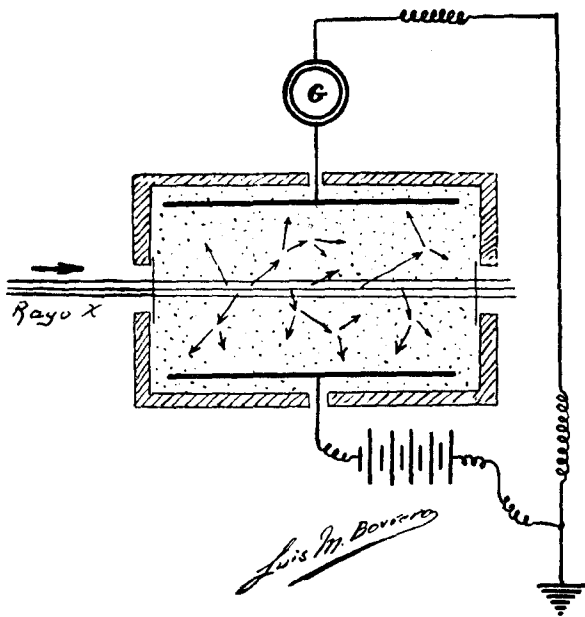
En resumen: *cuando los Rayos X atraviesan un gas, son absorbidos parcialmente; la energía absorbida se gasta en ionizar el gas y la emisión corpuscular correspondiente (es decir, la producción de iones de los dos signos) es proporcional a la dosis de rayos que se absorbe; por consiguiente, medir la ionización producida por un haz de rayos es medir la fracción absorbible o activa de los mismos.*

Sobre las bases que acaban de exponerse, el Committee for Radiological Units definió en 1937 la Unidad C. G. S. de dosis de radiación como la *dosis de Rayos X (o γ) que produce en 1 c.c. de aire en condiciones normales una emisión corpuscular tal que los iones transporten una unidad electromagnética de cada signo.* Esta unidad fue denominada "Roentgen" y se representa por la letra *r*.

Recordaremos de paso que la unidad electromagnética es una carga eléctrica tal que, colocada a 1 centímetro de distancia de otra carga idéntica la repele con la fuerza de una dina.

El hecho de que la definición de la unidad resulte un poco complicada, carece de gravedad para quien hace terapia por los rayos, puesto que a ese tal sólo le interesa disponer de una unidad de medida y de un método fácil para hacer las mediciones.

Reducido a sus partes esenciales, el aparato que permite realizar las medidas denominado "Cámara de Ionización" (Esquema V), es una cámara cerrada en sus extremos por delgadas láminas de mica o celofán y en cuyo interior se encuentran las placas que habrán de hacer la captación de iones; un galvanómetro permitirá medir la carga recibida por una de las placas y una batería eléctrica crea entre las placas una diferencia de potencial suficiente para captar los iones antes de que se recombinen. El haz de rayos penetra a través de una de las placas de mica y va liberando electrones, por impacto directo, a lo largo de su trayectoria (efecto primario), los electrones así originados,

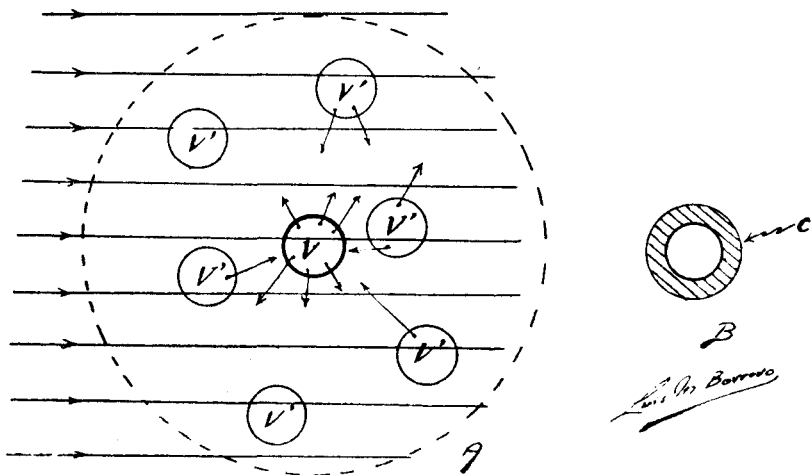


Esquema V

que poseen una energía, procedente de los mismos rayos, la agotan en el resto de la cámara, antes de llegar a las placas cargadas, produciendo una nueva cantidad de iones (efecto secundario).

c) *Medidas con la "cámara de dedal"*: Sin embargo, el método de la cámara de ionización no es práctico porque su manejo es delicado y dispendioso; por esto se buscó un medio más sencillo: puesto que basta coleccionar la electricidad de un solo signo, es suficiente colocar un cuerpo electrizado en el área afectada por los rayos, ya que tal cuerpo captará los iones de carga contraria a la suya propia; la variación de carga de este cuerpo permitirá "contar" los iones producidos y si como cuerpo electrizado se emplea un *electroscopio* previamente cargado, la variación que se observe en la posición de sus laminillas después de la exposición a los rayos, será una medida de la cantidad de iones coleccionada; para ser exactos es preciso que el electroscopio sólo capte los iones procedentes de 1 c.c. de aire medido en condiciones normales; veamos cómo se realiza esto (tomamos la explicación de *Radiological Physics*):

“Sea una masa de gas barrida por los Rayos; supongámosla dividida en celdillas de 1 c.c. Los electrones producidos en la unidad de volumen V (Esquema VI-A) salen de ella y afectan el área que la rodea, produciendo un efecto ionizante en los departamentos V' (también de 1 c.c.), pero a su vez, los electrones procedentes de dichos departamentos V' , llegan a V aumentando la ionización existente en ese sitio; como todas las masas de gas son idénticas, el efecto ionizante total será la suma de los efectos ionizantes de cada una de las unidades de volumen (que son idénticos); por lo tanto, el cociente resultante de dividir el número de iones presente en la masa de gas irradiada por el número de unidades de volumen, que hay en ella,



Esquema VI

será el número de iones producido en la unidad de volumen, es decir, será la ionización en 1 c.c. de gas. Por consiguiente sería posible determinar la dosis de radiación midiendo la ionización en cada unidad de volumen V , pero para ello sería preciso poder contar *solamente* los iones presentes en ella y esto no es fácil; como la ionización en el espacio V es la resultante de la acción directa de los rayos y de la acción de una esfera de gas que la rodea (representada en trazo discontinuo en el esquema), al comprimir esa masa de gas de manera que rodeara al espacio V (Esquema VI-B), no se habría cambiado nada fundamental porque si las moléculas del gas están ahora más próximas y reciben más

choques de los electrones, esa misma proximidad de las moléculas reduce el espacio recorrido por aquéllos, de manera que el efecto ionizante definitivo es el mismo que antes de comprimir. Sin embargo, comprimir ese aire sin alterar la ionización es difícil y resulta más práctico reemplazar la capa de aire comprimido por una capa de alguna sustancia tal que sometida a la acción de los rayos tenga un efecto ionizante idéntico: se ha hallado que la baquelita cumple esta condición.”

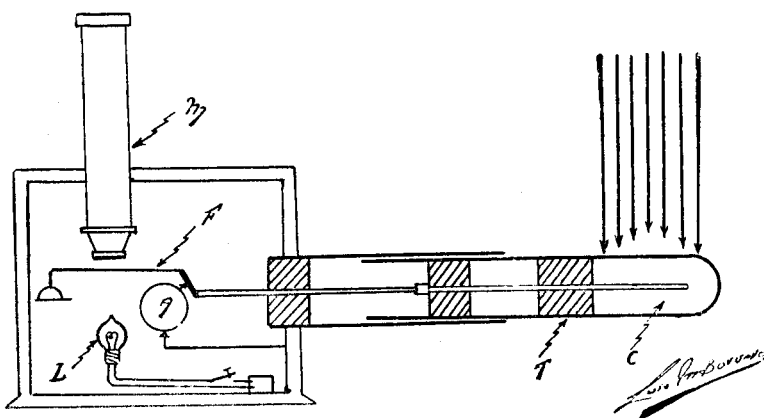
Todo este largo razonamiento nos conduce a lo siguiente:

Si se expone a la acción de los Rayos X una cámara de baquelita de 1 c.c. de capacidad y cuya pared tenga un espesor conveniente, se produce en el interior de ella una ionización igual a la que tiene lugar en 1 c.c. de dicho gas sometido a la acción de los Rayos; esta conclusión que parece una nonada, tiene una importancia grande: la pared de baquelita aísla el centímetro cúbico de gas, de manera que no se va a contar sino el número de iones existente en dicho centímetro cúbico. Por lo tanto, la dosis de rayos que libere una unidad de electromagnética de electricidad de cada signo, al actuar sobre la cámara, será la dosis unidad, es decir, el Roentgen o r .

Para hacer la captación de iones en la cámara, se coloca en su eje un vástago delgado de aluminio que, por su otro extremo, se pone en contacto con el electroscopio; además, la cara interna de la cámara misma se reviste de grafito, a fin de hacerla conductora; cargando el electroscopio, el vástago de aluminio (que está aislado de la pared de la cámara mediante un tapón de ámbar, Esquema VII) atraerá iones de signo opuesto al de la carga del electroscopio, mientras que la pared de la misma cámara recoge los de signo igual a dicha carga.

El electroscopio suele ser de filamento de cuarzo y sus desviaciones se leen mediante un micrómetro graduado en unidades r ; además, el electroscopio posee un aparato de fricción que permite cargarlo fácilmente, hasta unos 400 voltios.

Para hacer una medida se carga el electroscopio moviendo el aparato de fricción y se nota la división a ocupada por el filamento; se coloca la cámara bajo el haz de rayos durante un tiempo t y se anota la posición del filamento, b , al final de dicho tiempo; el cociente $\frac{a-b}{t}$ indica el número de r que es capaz de suministrar la radiación estudiada en la unidad de tiempo.



Esquema VII

d) *Fantasma de Solomón, medida de la dosis en el sitio irradiado*: Aun así el método deja qué desear:

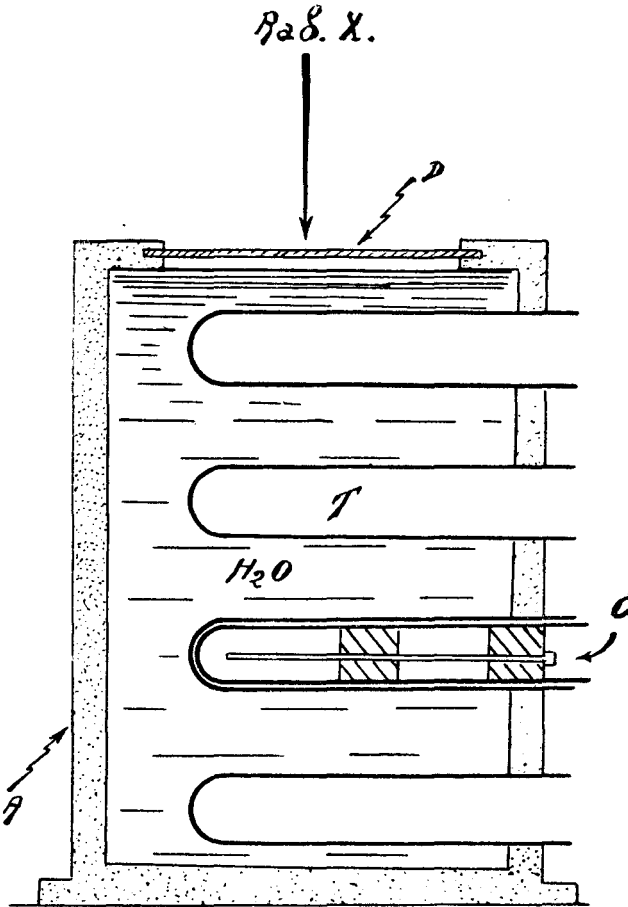
La magnitud de la ionización varía con la longitud de onda y la intensidad de la radiación, y es posible que el aparato resulte insuficiente para medir radiaciones muy intensas; se subsana el defecto disponiendo de varias cámaras de capacidad variable (25, 100, 250 y 1.000 r) que pueden adaptarse al electroscopio mediante un enchufe de bayoneta.

Si la radiación estudiada comprende rayos de longitudes de onda muy diversas y el sitio por irradiar es profundo, los rayos más "blandos" (mayor longitud de onda) serán absorbidos antes de llegar al sitio en donde deben realizar su acción y los resultados de una medida verificada en el aire son completamente engañosos; se soluciona la dificultad asociando dos procedimientos diferentes: la filtración de los rayos y el empleo de "fantasmas" o realizando la medida de la intensidad de la radiación en el sitio irradiado.

La filtración se realiza haciendo cruzar el haz de rayos a través de placas de material absorbente que sólo dejan pasar los rayos más duros o penetrantes. Variando el filtro se varía la dureza de los rayos utilizados, cosa que también está condicionada por los caracteres del tubo productor y sus condiciones de funcionamiento; en todo caso es indispensable suprimir los rayos muy blandos (que son nocivos por lo general) y emplear haces

“puros” de rayos, es decir, haces de Rayos X de longitud de onda perfectamente definida, haces monocromáticos.

El fantasma de Solomón permite medir aproximadamente cuál es la intensidad útil de la radiación en el punto tratado: Consiste en una cuba de agua en cuyo interior puede colocarse



Esquema VIII

la cámara del electroscopio a profundidades diversas (dentro de tubos delgados de baquelita de espesor conveniente). (Ver esquema VIII). Se ha probado que la absorción de rayos por la capa de agua y los tubos de plástico equivale aproximadamente a la

de un espesor igual de tejidos blandos del hombre, de manera que si se desea conocer la dosis de radiación que llega a un punto colocado, por ejemplo, a 10 centímetros de la piel, basta medir esa dosis con la cámara del electroscopio colocada a 10 centímetros de la superficie del agua en el aparato de Solomón. El hecho de que la cámara puede separarse del electroscopio facilita grandemente la medida, porque puede cargarse el electroscopio, anotar el valor a , someter la cámara a la acción de los rayos durante t segundos, conectarla nuevamente al electroscopio y hacer la lectura de b .

Pero puesto que el método de Solomón es sólo aproximado y la intensidad de la radiación es función de la distancia al tubo, puede hacerse una medida directa colocando la cámara en el sitio irradiado; así: en el Instituto de Radium de París los colaboradores del Profesor Régaud hacían medidas colocando en la vagina y el útero cámaras especialmente diseñadas para ese fin. Como es claro, este método da la máxima seguridad en cuanto a determinación exacta de la dosis.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Conferencia del doctor Roberto Restrepo sobre "Dosimetría de los Rayos X". (Curso de Cancerología en el Instituto Nacional de Radium de Bogotá, 1945).
- 2 **Strohl A.** "Physique Medicale".
- 3 **Weyem Warrem and O'Neill.** "Radiological Physics".
- 4 **Ledoux-Duvillier.** "La Physique des Rayons X".
- 5 Datos verbales del Profesor Alfonso Esguerra Gómez.