

**INTRODUCCIÓN A LA  
PROTECCIÓN RADIOLÓGICA  
HOSPITALARIA.  
EPIDEMIOLOGIA Y RIESGOS  
LABORALES**

*José Alfredo Piera Pellicer*

## Introducción

La figura del Prof. Wilhelm Conrad Röntgen, descubridor de los rayos X, hace ciento cuatro años y que actualmente sigue el mismo principio físico, si bien se han modernizado la tecnología en los equipos de rayos X. Aportó a la humanidad un descubrimiento por casualidad; pero es de justicia decir que para poder obtener fruto de las casualidades, cuando ocurren, hay que estar en el lugar oportuno y con los conocimientos necesarios para interpretar estas casualidades, que pasarían desapercibidas a la mayoría de personas sin esta formación.

El inicio de su descubrimiento fue cuando vio que las radiaciones eran capaces de atravesar unos gruesos libros y con posterioridad puso su mano la que observó por el principio que posteriormente hemos denominado como escopia, no pudiendo registrar la imagen. Fue posteriormente cuando radiografió la mano de su mujer (Berta), quedando inmortalizada dicha mano como la primera placa radiográfica de la historia.

La aplicación de los rayos X no solamente supuso un avance importante en la medicina, sino que también lo fue en la industria, astronomía, biología, antropología, etc. Sin embargo éstos rayos tiene un efecto somático sobre el ser humano, que sufrieron los profesionales de la sanidad hace décadas y que nosotros cada día conocemos mejor y obligación profesional es el aprovechar todas las ventajas que nos aporta el descubrimiento de los rayos X y evitar al máximo sus efectos indeseables.

## Biografía

Wilhelm Conrad Röntgen, descubridor de los rayos X, nació el 27 de marzo de 1845 en Lennep (Renania), en el seno de una familia acomodada. Para estudiar su biografía hemos clasificado su vida en infancia, adolescencia Universitario e Investigador.

## Infancia

Los tres primeros años de su vida estarán marcados por los sucesos revolucionarios de 1848, que partiendo de Francia, irán convirtiéndose en el contexto histórico predominante en la mayor parte del continente europeo. Las causas o detonantes de dichas secuencias poseen unas raíces económicas y sociales. La existencia de una situación prerevolucionaria en muchos países europeos, junto con la crisis agrícola e industrial de 1847, *que provocó una recesión general y un enorme paro*, producirán un malestar generalizado entre la población que, imitando de nuevo a Francia, al igual que en 1789, inaugurará en los diferentes países toda una serie de jornadas revolucionarias.

En esta fecha se fueron sucediendo una serie de acontecimientos históricos trascendentes que perfilaban el futuro geográfico de la zona centro-europea.

Este contexto de inestabilidad ponía incluso en peligro la integridad física de una familia acomodada, debido a la acción del pueblo embravecido, precisamente éste será el motivo por el que la familia Röntgen se verá obligada a refugiarse en Apeldoorn, Holanda, el país de la madre, donde Wilhelm pasará su juventud. Años más tarde se trasladará a Utrecht, cursando allí el bachillerato.

## **Adolescencia**

Es cuando, atendiendo a las diferentes fuentes bibliográficas consultadas, surge una dualidad de opiniones respecto a la finalización o no de dicho nivel de estudios. Mayoritariamente se niega la conclusión de dicho ciclo debido a su falta de interés por las lenguas muertas, mientras que contrariamente se darían por concluidos dichos estudios, aunque le sería imposible poder continuar los grados superiores, al encubrir una travesura de un compañero de clase.

Terminara o no el bachillerato, continuó su trayectoria intelectual en la Escuela Cantonal de Zurich, en donde no precisaba éste título, una vez superado el examen de ingreso. En esta institución se titulará como ingeniero mecánico en 1868, doctorándose en ciencias sólo un año después, en 1869, con 24 años de edad.

---

*El Estado prusiano adquirió Renania en el Congreso de Viena de 1815, ampliando así la parte occidental del Imperio, pero esta incorporación fue breve, sólo hasta 1866, debido al inicio del proyecto de unificación alemán, quedando todos los territorios integrados en un único Imperio centro-europeo, alcanzando su máxima extensión geográfica con Hitler como primer mandatario.*

*Este hecho precisamente será el que propicie uno de los dos grandes conflictos bélicos a nivel mundial, la segunda guerra mundial, conflicto que terminará definitivamente con el sueño del gran imperio alemán. Concluido el conflicto, Alemania quedará dividida en tres partes: Austria, la República democrática alemana y la República federal alemana, estando integrada Renania en esta última. En 19...se reestructuró el mapa centro-europeo y las dos repúblicas nombradas anteriormente pasaron a formar un sólo país: **Alemania**.*

## **Universitario**

Tras la consecución de dichos títulos seguiría trabajando en Zurich, bajo la dirección de August Kundt (1839-1894). En 1870, a los 25 años de edad, se daría a conocer a través de una comunicación: *Sobre la relación de los calores específicos del aire*. Este trabajo marcará el inicio de sus publicaciones y la intensificación de sus investigaciones más especializadas.

En 1874, con 29 años, se doctoró en Estrasburgo y permaneció en dicha ciudad hasta 1879 como profesor auxiliar, puesto que ocupaba desde 1876. Este nuevo traslado es el primero de una larga etapa caracterizada por los continuos cambios de residencia.

Desde 1879 hasta 1885 su destino será Giessen, donde permanecerá como profesor numerario en la Universidad y director del Instituto de física. Pasados estos seis años Würzburgo se convertirá en su próxima residencia. En dicha localidad trabajará como profesor numerario hasta que en 1888 sea nombrado profesor titular en la Universidad Julius Maximilian, obteniendo la cátedra de física y siendo nombrado rector seis años más tarde, en 1894.

En 1900 finalizará su etapa en Würzburgo, al obtener la cátedra de física de la Universidad de Ludwin Maximilian de Munich, donde también dirigió el nuevo Instituto de física hasta 1920, experimentando durante estos últimos años de su vida con gases enrarecidos.

## Investigador

A lo largo de todos estos años fue centrando sus investigaciones en una serie de temas específicos que podrían englobarse en tres grandes apartados:

- El calor específico de los gases.
- Los fenómenos de: *elasticidad, compresibilidad, capilaridad y conductibilidad del calor de los cristales*.
- La absorción de los rayos calóricos en los vapores y en los gases.

En sus primeras investigaciones descubrió la birrefringencia o doble refracción de los líquidos sometidos a un campo eléctrico. En 1885 demostró que un dieléctrico polarizado produce los mismos efectos magnéticos que una corriente.

Todas sus investigaciones se verán culminadas en 1895, año del descubrimiento que le daría la inmortalidad, hecho que se produjo a sus 50 años de edad. Pero, su consecución no hay que concebirla como un fenómeno aislado y totalmente desligada de los estudios coetáneos, existirán una serie de antecedentes que irían configurando los medios y conocimientos que utilizará Röntgen en sus trabajos.

Este científico culminó magistralmente unas investigaciones que había ido evolucionando de forma gradual y que, tras su descubrimiento, se convertirá en uno de los aspectos científicos más estudiados, con el fin de ir depurando y perfeccionando el conocimiento de su naturaleza y sus aplicaciones.

Antes de analizar minuciosamente la génesis del importante descubrimiento, así como su impacto, desarrollo y repercusión, hay que mencionar los antecedentes que sirvieron de base para los trabajos de Röntgen. Para ello es necesario recordar algunos nombres propios, que con sus investigaciones fueron vislumbrando los mecanismos que posteriormente serán de gran ayuda para el físico alemán. Los más destacados son: Julius Plücker, Sir William Crookes y Rudolf Heinrich Hertz.

- **J: Plücker** descubrió los rayos catódicos en 1859. Estos se observaban a través de los tubos de Geissler (1854). Los cátodos formaban un haz de electrones que atravesaban el tubo rápidamente, a una velocidad directamente proporcional a la tensión aplicada en los extremos (aplicando una tensión de un millón de voltios los electrones circularían a una velocidad de 285000/km/s). Su trascendencia radica en que Röntgen utilizará este tipo de tubos de cátodo incandescente en sus experimentos.
- **W: Crookes** (1832-1919), químico y físico inglés, fue de los primeros en interesarse por el análisis espectral, y por este medio descubrió, en 1861, el *talio*, determinando todas sus propiedades físicas y químicas. En 1875 inventó el radiómetro, y posteriormente, estudiando los fenómenos relativos a la descarga de los gases enrarecidos, identificó los rayos catódicos.
- **El físico alemán R. H: Hertz** (1857-1894) llevará a cabo un conjunto de investigaciones que en el futuro se convertirán en importantes referencias para Röntgen. Aunque dedicara sus primeros años de formación a los estudios de arquitectura, renunció a ellos en 1878 para consagrarse a la investigación científica, siendo Helmholtz, su profesor, quien lo orientó hacia el estudio de la electrodinámica.

Después de doctorarse en 1880, permaneció cinco años en la Universidad de Kiel como profesor conferenciante. En 1885 se establecerá en Karlsruhe como profesor en la escuela técnica superior, localidad donde realizará los trabajos más importantes y trascendentes, que aportaran grandes conocimientos al mundo de la física. Estas investigaciones se centran en las ondas electromagnéticas.

En 1887 produjo ondas métricas gracias a su oscilador y demostró

que poseían todas las propiedades de la luz: reflexión y refracción, interferencias, difracción, polarización y velocidad de propagación. Descubrió el efecto fotoeléctrico al observar que la formación de la chispa se veía facilitada cuando la zona sensible de su resonador recibía luz ultravioleta.

En 1892 observó, antes que Philipp Lenard (1862-1947), que los electrones podían atravesar la materia, al hacer pasar unos rayos catódicos de unas finas placas de oro o de aluminio.

Hertz murió demasiado pronto para poder asistir al prodigioso desarrollo de las aplicaciones de sus ondas, a las que se ha dado el nombre de herzianas.

Partiendo de los conocimientos anteriormente mencionados, Röntgen inició en su laboratorio las investigaciones, utilizando tubos de cátodo incandescente.

Concentró el flujo de electrones con un cátodo en forma de espejo cóncavo, proyectándolos sobre una superficie, lo más pequeña posible, de la pared de vidrio del tubo, revistiendo la totalidad del tubo con papel negro y oscureciendo el laboratorio.

Conectó el tubo de rayos catódicos a un circuito, haciendo pasar una corriente de alta tensión. En esos momentos, todo lo que quería saber era si el cartón recubría totalmente el tubo. Satisfecho, se dirigió hacia el aparato para proseguir su experimento cuando, aproximadamente a un metro del tubo, descubrió que una pantalla cubierta con una masa especial, *de cianuro de platino y bario*, situada cerca del tubo, comenzaba a emitir una luz verdosa.

Sorprendido, que los rayos catódicos no atravesaban la pared del tubo y los rayos de luz no podían salir a través del revestimiento, cogió con la mano la pantalla luminosa y la acercó al tubo. En ese instante la luz se hizo más intensa y sobre la pantalla vio proyectados los huesos de los dedos de su mano.

Desconectó el tubo, y la placa revestida de bario cesó de emitir el resplandor; volvió a conectarlo, y brilló de nuevo. ***Röntgen acababa de descubrir los rayos X.***

Los había descubierto casi accidentalmente, al estudiar la descarga gaseosa, merced a la fluorescencia que se originaba en las proximidades del tubo. Supuso que cuando los rayos catódicos incidían sobre las paredes de vidrio, y más aún cuando lo hacían sobre un electrodo metálico especial, denominado anticátodo, introducido dentro del tubo, se originaba una

radiación que parecía emitida por el anticátodo, independientemente de la posición del ánodo.

A partir de esos momentos centró en ello toda su atención. Se instaló en un laboratorio durante varias semanas, durmiendo y comiendo allí, y demostró que esas radiaciones:

- se propagaban en línea recta,
- no podían ser reflejadas ni refractadas,
- los campos eléctricos no ejercían ninguna acción sobre ellas.

También estudió su poder de penetración en la materia y observó que producían una ionización en el aire. A continuación sustituyó la pantalla fluorescente por la placa fotográfica, y obtuvo sobre ella asombrosas imágenes, siendo la más famosa la mano descarnada y esquelética de su mujer.

Este último aspecto nos lleva a un punto de confusión. Generalmente se ha considerado la imagen de la mano de su mujer como la primera lograda, y aunque en parte es correcto, hay que hacer una pequeña matización. *Esta imagen sería la primera radiografiada, es decir, la primera que el científico obtuvo una vez colocada la placa fotográfica, sustituyendo a la pantalla fluorescente.*

*Pero, la primera imagen reflejada en sus experimentos sería la de los huesos de su propia mano, aunque evidentemente no hay ninguna prueba visible de ello, únicamente se tiene constancia a través de algunos de los escritos que han narrado dicho experimento.*

Röntgen no bautizó su descubrimiento con su nombre, no debido a un gesto de modestia y humildad, como algunos estudiosos han interpretado. Utilizó la letra X para el nuevo fenómeno porque era el símbolo utilizado habitualmente por los físicos para designar un factor desconocido, y en este caso inexplicado.

Respecto a su denominación concreta, se ha hecho referencia a unos motivos estrictamente científicos, y que corresponderían a las propias características del fenómeno. Siguiendo esta interpretación, el físico les daría el nombre de rayos X por sus singulares caracteres:

- Eran invisibles, pero impresionaban las placas fotográficas aún cubriéndolas con papel negro. Esta propiedad fue precisamente el origen del descubrimiento.
- Excitaban la fluorescencia.
- Ionizaban el aire y demás gases.
- Atravesaban gran número de cuerpos opacos para la luz.

Cuando Roentgen presentó su primer informe: *Sobre una nueva variedad de rayos*, el 28 de diciembre de 1895, ya había realizado un examen sistemático completo de estos rayos y podía dar una descripción precisa de la mayor parte de sus propiedades fundamentales.

Cuatro semanas más tarde daba su primera conferencia pública, con el fin de proceder al relato de su descubrimiento. En un momento determinado, una vez comenzada la sesión, pidió permiso a su amigo anatomista, de setenta y ocho años de edad, *Albert Von Kölliker*, para radiografiarle. Von Kölliker aceptó y, minutos más tarde, Roentgen mostró la placa en la que se podían ver los huesos del anciano. Este hecho provocó el estallido del auditorio en un tumultuoso aplauso.

Estas aclamaciones resonaron en el mundo estero. Además de ser un fenómeno espectacular, los principios fundamentales que lo gobernaban eran fácilmente comprensibles y sus aplicaciones saltaban a la vista. *Sólo cuatro días después de haberse conocido en América el descubrimiento de Röentgen, se recurrió a los rayos X para localizar una bala alojada en una pierna.*

Muy pronto se exageraron las posibles utilizaciones, aparentemente ilimitadas, que se podían esperar de estos rayos. Su capacidad de desvelar lo que ocultaba una puerta cerrada e incluso el espesor de las ropas victorianas, despertó las primeras inquietudes sobre la violación de la intimidad a través de los aparatos científicos.

Pero, paralelamente a estas reacciones casi histéricas, se desarrolló una actividad más discreta en el mundo entero. *En tan sólo un año, se publicaron cuarenta y ocho libros y más de mil artículos a propósito de los nuevos rayos X.* Su enorme capacidad de penetración los convertía en un medio básico para explorar y redefinir la estructura de la materia.

Del mismo modo, terminaba definitivamente con la creencia, vigente desde hacia tiempo, de que el átomo era la última partícula inviolada e inviolable (la teoría atomista clásica). En definitiva, se habían desmoronado los cimientos sobre los que se había asentado la física de la época hasta esos momentos y comenzaba una nueva era.

El mundo científico británico mostró un gran interés por estas novedades que llegaban desde el ámbito alemán. Silvanus P. Thompson, que ocupaba la cátedra de física del Finsbury Technical College, escribió a un amigo lo siguiente:



*" El mundo de los inventores parece ser presa de un doble delirio: la bicicleta y los rayos X. En cuanto a estos, confieso haberme dejado captar seriamente por el juego."*

La Universidad de Cambridge comprendió de forma inmediata el alcance del descubrimiento, y mientras publicaba sus observaciones, ampliaban considerablemente el número de experimentos. El 15 de enero de 1896, un neozelandés licenciado en física, Ernest Rutherford, en una carta a su prometida, explicaba la rapidez con qué reaccionaban los investigadores del laboratorio de Cavendish, sobre todo haciendo referencia a su profesor J. J. Thompson:

*" He visto las fotografías que se han hecho hasta la fecha. Hay una excelente de una rana. Restituye los contornos y muestra muy claramente todo el esqueleto interno. Naturalmente, el profesor trata de encontrar la verdadera causa y naturaleza de las ondas, y el gran reto es descubrir la teoría antes que los demás, casi todos los sabios europeos se encuentran ahora en pie de guerra."*

Roentgen no sólo realizó un descubrimiento espectacular, sino que con él abrió todo un campo para la investigación. En todos los ambientes académicos y científicos este fenómeno se convirtió en el centro de atracción, como muestran los testimonios aludidos en las líneas anteriores. Pero, además de convertirse en el punto de partida de numerosos estudios, inmediatamente surgieron las aplicaciones biológicas y médicas que, desde entonces, no dejarán de desarrollarse.

El descubrimiento de los rayos X llevará al descubrimiento de la radioactividad en 1898, a cargo de los esposos Curie (Pierre y Marie) y H. Becquerel, hecho que les proporcionó el Premio Nobel de física en 1903. Estos fenómenos conducirán, en los años posteriores, al mundo del átomo y, en definitiva, a la energía nuclear. Se puede afirmar con toda seguridad que el 28 de Diciembre de 1895, con Roentgen, se inició la era atómica.

Este importante descubrimiento fue, por tanto, reconocido a nivel mundial. En diferentes naciones se fundaron instituciones que tomaron la denominación de **Sociedades Röntgen**. En 1896 recibió la medalla Rumford de la *Royal Society* de Inglaterra. En 1901 fue galardonado con el Premio Nobel de física. Este premio supondría el fruto de toda una vida dedicada a la investigación, que terminaría el 10 de noviembre de 1923 en Munich.

A pesar del descubrimiento de los rayos X lo que lo llevo a la cumbre en el mundo científico, proporcionándole incluso el Premio Nobel, Röntgen era ya un científico que gozaba de un gran prestigio. Siguiendo las palabras del físico alemán Arnold Sommerfeld:

*Roentgen merecería figurar entre los grandes físicos del siglo XIX aunque no hubiese descubierto los rayos X.*

NO COPIAR

# INTRODUCCIÓN FÍSICA NUCLEAR

## Estructura del átomo

Los átomos están formados por dos zonas bien diferenciadas: una región central, *el núcleo*, y alrededor de ella otra región periférica o *corteza*, constituida por un cierto número de electrones.

El núcleo a su vez, está constituido por dos tipos de partículas elementales, llamadas protones y neutrones. Ambas partículas denominadas conjuntamente nucleones tienen aproximadamente la misma masa, siendo la del electrón 1836 veces menor que la del protón. Ambos, protón y electrón, tienen carga eléctrica de igual magnitud, positiva del protón, negativa del electrón, careciendo de ella el neutrón.

Normalmente los átomos se encuentran en estado eléctrico neutro, es decir, con el mismo número de electrones en la periferia que de protones en el núcleo. Dicho número de una u otra clase de partículas constituye el llamado número atómico  $Z$ , característico de cada elemento.

Los números atómicos de los elementos existentes en la naturaleza comprenden números enteros desde  $Z = 1$  para el hidrógeno hasta  $Z = 92$  para el uranio.

Las propiedades químicas de un elemento dependen de su número atómico  $Z$ , y de los electrones existentes en la capa más externa llamada capa de valencia. Los electrones de valencia entran a formar parte de los enlaces químicos de los elementos al formarse las moléculas.

Los elementos que forman la corteza giran alrededor del núcleo describiendo determinadas órbitas a las que se les designan con las letras K, L, M, N, O, P, Q, en orden de menor a mayor distancia. A cada órbita corresponde un cierto nivel energético: las más cercanas al núcleo poseen los niveles de energía más bajas.

La energía de ligadura de un electrón atómico es la energía necesaria para arrancarlo del átomo. Dado que los electrones se encuentran situados en órbitas de energía determinada, o niveles discretos, las energías requeridas para separarlos del átomo serán igualmente discretas y características de cada elemento químico.

## Unidades de energía en física atómica

La física atómica y nuclear para expresar la energía se utiliza una unidad especial: el electronvoltio (eV) y sus múltiplos de kiloelectronvoltio (1keV = 1000 eV) y el Megaelectronvoltio ( 1MeV = 1.000.000 eV).

Se define el electronvoltio como la energía cinética que posee un electrón, inicialmente en reposo, después de ser acelerado en el vacío por la diferencia de potencial de un voltio.

Equivale a :  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$  julios.

## Ondas electromagnéticas

Toda carga eléctrica en reposo produce en cada punto del espacio que la rodea, un campo eléctrico estacionario que disminuye al aumentar la distancia entre la carga y el punto considerado. A su vez, toda corriente eléctrica continua y constante, produce en cada punto del espacio un campo eléctrico y un campo magnético también estacionarios y cuya intensidad disminuye al aumentar la distancia.

En cambio, toda corriente eléctrica variable, o toda partícula cargada dotada de movimiento acelerado, producen en cada punto campos eléctricos y magnéticos que varían con el tiempo y que se propagan a través del espacio en forma de movimiento ondulatorio. La propagación de estos campos constituye la *onda electromagnética*.

Toda onda electromagnética supone una propagación de energía a través del espacio y por tanto una transmisión de energía desde el sistema que la produce hasta el sistema que la recibe. Un caso particular lo constituyen las ondas electromagnéticas, las cuales suponen la transmisión de energía desde la antena transmisora hasta las antenas receptoras. Así mismo las ondas o rayos luminosos suponen también una transferencia de energía desde los átomos o moléculas que los producen hasta las superficies que los reflejan o absorben, así como hasta los ojos que las reciben o hasta las placas fotográficas que se impresionan.

La velocidad y propagación en el vacío de las ondas electromagnéticas se la designa por el símbolo  $c$  y vale aproximadamente:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Las ondas electromagnéticas, como ocurre en general con cualquier onda, están caracterizadas por su **frecuencia**,  $\nu$  y su **longitud de onda**,  $\lambda$ . La frecuencia representa el número de oscilaciones que efectúa el campo electromagnético por segundo y se expresa en Hercios (Hz). La longitud de onda representa la distancia más corta, que separa a dos puntos de la onda

que se encuentren en la misma fase o estado de oscilación, se mide en unidades de longitud (metros, múltiplos o submúltiplos).

Entre la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad, existe la relación:  $c = \lambda v$

Si estas ondas se propagan en el vacío:  $V = C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Cuando una onda electromagnética se transmite a través de un medio material se dice que éste es transparente para dicha onda: *un medio determinado puede ser transparente para unas ondas y opaco para otras*. Así los tejidos blandos del cuerpo son opacos para la luz visible y relativamente transparentes para los rayos X.

La velocidad de una onda electromagnética en un medio material transparente es menor que la velocidad en el vacío y viene dada por

$$V = \frac{c}{n}$$

donde  $n$  es el índice de refracción del medio considerado para la onda en cuestión. Para el vacío  $n = 1$

Las ondas electromagnéticas están constituidas por pequeños paquetes de ondas, llamadas fotones o cuanta de radiación. Cada fotón tiene dimensiones limitadas que no cambian al propagarse por el vacío.

Cada fotón posee una determinada cantidad de energía que es proporcional a la frecuencia de su onda y viene dada por:

$$E = \eta v = \frac{hc}{\lambda}$$

siendo:

$v$  = frecuencia del fotón (hertzios)

$\lambda$  = longitud de onda (metros)

$c$  = velocidad de la luz (m/s)

$h$  es una constante física fundamental, llamada constante de Planck cuyo valor es, en el sistema internacional de unidades.

$$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ julios segundo.}$$

El conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas constituyen un espectro continuo de una amplitud extraordinaria y que se extiende desde las ondas electromagnéticas largas hasta los rayos gamma más energéticos. La luz visible con toda su variedad de colores, constituye una porción muy reducida del espectro y se extiende desde el orden de  $7 \times 10^{-7}$  (luz roja)

hasta  $4 \times 10^{-7}$  m (luz violeta). Cada uno de los fotones de luz visible tienen una energía del orden del electronvoltio, mayor que los de luz infrarroja, menor que los de luz ultravioleta y mucho menor que los de rayos X o rayos gamma.

## Excitación e ionización

Las órbitas descritas por los electrones de un átomo cualquiera se distribuyen en capas, correspondiendo a cada órbita un nivel energético determinado. Los electrones de cualquier átomo ocupan normalmente las órbitas más cercanas al núcleo, a las que corresponden los niveles de menor energía, pero pueden ser desplazados temporalmente a órbitas más lejanas y ser expulsados del átomo. Cuando un átomo absorbe energía, y esta es mayor que la de ligadura de alguno de sus electrones corticales se produce un fenómeno llamado ionización, donde el átomo se escinde en un electrón y en un ion positivo.

La excitación de un átomo se produce al absorberse en la corteza una energía capaz de producir el desplazamiento de electrones desde sus órbitas estables a otras más elevadas. Esto puede realizarse, por ejemplo, bombardeando los átomos de un gas mediante un haz de electrones libres previamente acelerados. Si estos electrones no poseen energía suficiente para provocar alguna transición de los electrones atómicos a niveles de mayor energía, tendrán lugar los llamados choques elásticos entre unos y otros. En estas colisiones se conserva la energía cinética o de movimiento.

En cambio, por el impacto de electrones incidentes de mayor energía, los electrones orbitales pueden absorber la necesaria para saltar a un nivel superior, disminuyendo en la misma cantidad la energía cinética del electrón incidente. Ha tenido lugar, entonces, un llamado *choque inelástico*, en el que el electrón incidente pierde parte de su energía cinética. Se dice entonces que el átomo se halla en un nivel excitado.

Los átomos excitados tienden a desexcitarse espontáneamente, porque los niveles de menor energía de cualquier sistema son más estables. Por consiguiente, los electrones que han sido desplazados de sus niveles normales vuelven a ellos en un tiempo muy corto liberando su exceso de energía mediante la emisión de un fotón, cuya frecuencia, si el salto se produce entre los niveles de energía  $E_2$  y  $E_1$ , vendrá dada por la expresión:

$$\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$$

Siendo  $h$  la constante de Planck

Cuando a un átomo se le ha arrancado algún electrón de una capa profunda, queda un hueco llamado vacante que tiende a rellenarse en un

tiempo muy corto con electrones de capas más periféricas. Esta reordenación de la corteza atómica supone la emisión de energía en forma de fotones (rayos X característicos) cuya energía dependerá de los niveles de partida y de llegada del electrón y del número atómico del átomo, parámetro del que depende la energía de los distintos niveles. A medida que aumenta Z, las energías de las transiciones son mayores.

## Interacción de electrones y fotones con la materia

### Tipos de colisión

Cuando las partículas cargadas interactúan con la materia, se produce una serie de efectos que son función del tipo de partícula, de su energía y de ciertas características del medio con el que interactúan (estado físico, composición, etc.).

Las partículas cargadas pierden su energía fundamentalmente al colisionar con la materia en uno de los siguientes procesos:

**a.- Colisión elástica.-** la partícula choca con los átomos del medio desviándose de su trayectoria y cediendo una cierta cantidad de energía en forma de energía cinética. No se produce alteración atómica ni nuclear en el medio.

**b.- Colisión inelástica.-** la partícula choca con los átomos del medio modificando la estructura electrónica de los mismos produciendo excitación (desplazamiento de electrones a niveles energéticos más externos), ionización (arrancando electrones del átomo), y disociación (rotura de enlaces químicos).

**c.- Colisión radiativa.-** la partícula cargada se frena y desvía de su trayectoria en su interacción eléctrica con los núcleos del medio, y como resultado se emiten ondas electromagnéticas. Este es el fundamento de la producción de rayos X, al frenar un haz de electrones en su colisión con un absorbente.

La interacción de las partículas cargadas con la materia dependen de su carga, masa y energía, y del número atómico del medio absorbente. En general por ser muy distinto comportamiento en su pérdida de energía, las partículas se clasifican en *pesadas* (protones, partículas alfa) y *ligeras* (electrones).

### Poder de frenado y alcance

El poder de frenado  $S(E)$  se define en un medio, para una partícula determinada con una cierta energía, como la pérdida de energía por unidad de longitud de recorrido. Se expresa por ejemplo en KeV/cm.

El alcance de una partícula en un medio se define como la longitud total de penetración de la partícula en el material supuesto del recorrido rectilíneo.

### Interacción de electrones con la materia

Los electrones experimentan con la materia colisiones elásticas, inelásticas y radiativas.

Debido a la pequeña masa de estas partículas, las desviaciones que experimentan en sus interacciones son importantes; el recorrido ya no es casi rectilíneo como ocurre en el caso de partículas pesadas y así su alcance o penetración en un material es menor que el recorrido total del electrón. La pérdida de energía total se realiza fundamentalmente por dos vías: produciendo ionización (*colisiones inelásticas*) y emitiendo fotones (*colisiones radiativas*).

La pérdida de energía por radiación es tanto más importante cuanto mayor es la energía de los electrones, y más elevado sea el número atómico del absorbente.

Existe una expresión, (tanto más válida cuanto mayor es la energía de las partículas) que relaciona ambas pérdidas energéticas de forma muy simple. Llamando  $P_r$  y  $P_i$  a las pérdidas de energía por radiación e ionización se verifica aproximadamente:

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{ZE}{800}$$

Donde  $Z$  es el número atómico del medio y  $E$  la energía de la partícula expresada en MeV.

La radiación de frenado se denomina a veces, según su expresión en alemán, *Bremsstrahlung* y se emite en forma de fotones de espectro continuo cuya energía se extiende desde cero hasta una energía máxima que coincide con la energía cinética de la partícula cargada que interacciona.

Los fotones emitidos viajarán por el material depositando su energía en zonas más o menos distantes del punto de interacción o incluso escapando del material sin interacción.

Por ello, es importante destacar que, debido a la fracción de pérdida de energía por radiación, no toda la *energía perdida* por el electrón será



**absorbida** localmente en el elemento de masa donde se produzca la interacción. En general

$$E \text{ (pérdida o transferida)} > E \text{ (localmente absorbida)}$$

A la energía localmente absorbida por unidad de recorrido se le llama también transferencia lineal de energía o **LET** (*linear energy transfer*).

## **Espectro de los rayos X**

En los espectros emitidos por tubos de rayos X se distinguen dos componentes llamados radiación característica y radiación de frenado.

### **Radiación característica**

Se produce como consecuencia de creación de vacantes en capas profundas de la corteza atómica. El relleno de estas vacantes por electrones de capas más externas supone la emisión de la energía, o uno de sus electrones. Dicha emisión tiene lugar en forma de fotones, llamados **rayos X característicos**, en atención a que sus energías presentan valores definidos (esto es, espectro discreto) y propios de cada elemento químico.

### **Radiación de frenado**

Se produce cuando una partícula cargada que se mueve con movimiento uniforme y rectilíneo pasa por las proximidades de un núcleo atómico en cuyas condiciones la trayectoria se curva, para el caso de un electrón.

En estas condiciones, la partícula pierde energía en forma de espectro continuo que se extiende desde cero (paso de la partícula a una distancia muy grande del núcleo) a una energía igual a la de la partícula (colisión centrada de la partícula en el núcleo).

La intensidad de la onda electromagnética emitida resulta ser proporcional al cuadrado de la carga de la partícula y al cuadrado de la carga del núcleo con el que interacciona e inversamente proporcional a la masa de la partícula incidente.

El ejemplo citado explica la generación del espectro **continuo de rayos X**, al decelerarse un haz de electrones emitidos por un electrodo negativo cátodo bajo la acción de una diferencia de potencial eléctrico de valor adecuado. La radiación de frenado se origina al colisionar dicho haz con el electrodo de polaridad positiva o ánodo.

El espectro de la radiación de frenado presenta distinta forma según esté producido por electrones de baja energía (caso de los tubos

convencionales de rayos X) o de alta energía (caso de los betatrones y aceleradores lineales) así como según sea la importancia de la autoabsorción y/o filtrado de la radiación generada.

### **Forma de espectro de la radiación emitida por los tubos de rayos X**

En el espectro emitido por un tubo de rayos X, el espectro de frenado es continuo, con una energía máxima dependiente del kilovoltaje aplicado, y con una forma que depende de la forma de onda del kilovoltaje, de la naturaleza del ánodo y del espesor filtrante total interpuesto.

Cuando la energía de los electrones es suficiente para que, en su interacción con el material del anticátodo se produzcan vacantes en capas electrónicas profundas, se generan además rayos X característicos del material, de espectro discreto. En el wolframio, material que se usa en la mayoría de los tubos de rayos X de diagnóstico (excepto en mamografía, que es molibdeno), la tensión aceleradora necesaria es de 70 kV.

Los rayos X característicos aparecen cabalgando sobre el espectro continuo de Bremsstrahlung. Por lo dicho anteriormente, en un tubo con ánodo de wolframio, por debajo de 70 kV será posible el espectro continuo, pero no en el discreto, pues no se habrán producido vacantes en la capa K del wolframio.

### **Interacción de los fotones con la materia**

La interacción de fotones con la materia tiene un gran interés bajo dos puntos de vista, uno macroscópico, referido a los métodos de atenuación de un haz con objeto de limitar el flujo de fotones en las distintas zonas de una instalación a efectos de alcanzar niveles adecuados de radioprotección, y otro macroscópico, a fin de estudiar los procesos elementales de generación de fotones y su probabilidad en función del número atómico del absorbente y de la energía de la radiación en sus intervalos de interés (obtención de imágenes, radiología, etc.)

Los fotones al interactuar con la materia pueden experimentar absorción (desaparición de fotones del haz) o *dispersión* (disminución de energía y cambios de trayectoria de fotones del haz). A la combinación de procesos de absorción y dispersión se denomina atenuación.

### **Atenuación de fotones**

Si un haz monoenergético de fotones cuyo flujo es  $\phi$  fotones/cm<sup>2</sup>. s incide perpendicularmente sobre un material de espesor  $x$  se producirá una atenuación progresiva a medida que el espesor interpuesto vaya

aumentando, de suerte que el flujo primario emergente viene dado por la expresión

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\mu x}$$

donde

$\mu$  es un parámetro llamado *coeficiente de atenuación lineal*.

$x$  es el espesor del absorbente.

La forma de la expresión indica que un haz monoenergético de radiación sufre *atenuación exponencial* al atravesar un absorbente.

Hay que tener en cuenta que la validez de este enunciado requiere:

- a.- Fotones monoenergéticos
- b.- Haz colimado (fotones de trayectorias paralelas).
- c.- Espesor de absorbente delgado

Debido a la ley de atenuación exponencial, los fotones carecen de alcance definido. Sería necesario un valor infinito de  $x$  para que  $\varphi$  fuera igual a cero, no obstante se puede hablar de recorrido libre medio, que es la inversa del coeficiente de atenuación lineal y representa el promedio del recorrido de los fotones en el material antes de interactuar.

Para los fotones de un tubo de rayos X, la expresión anterior es inadecuada, pues los fenómenos que motivan la atenuación tienen diferentes probabilidades para fotones de distintas energías, ya que los fotones muy energéticos son muy penetrantes, mientras que los pocos energéticos son fácilmente absorbidos, en comparación con los primeros.

### **Coeficiente de atenuación lineal y másico**

El coeficiente de atenuación lineal,  $\mu$  que aparece en la anterior expresión representa la probabilidad por unidad de recorrido, de que un fotón sufra atenuación en el medio absorbente.

El coeficiente de atenuación lineal es función de la energía de los fotones y del número atómico efectivo del absorbente. Este coeficiente se suele expresar en  $\text{cm}^{-1}$  y en este caso el espesor  $x$ , en el exponente de la expresión debe expresarse en cm.

En muchas ocasiones es más útil que el espesor lineal de un absorbente  $x$ , el llamado espesor másico expresado en  $\text{g/cm}^2$ , y que se define como:

$$X_{\text{masico}} = X (\text{cm}) \cdot \rho (\text{g/cm}^3)$$

donde  $\rho$  representa la densidad del material en cuestión

En los problemas de atenuación en los que el espesor de absorbente se expresa en forma másica, se debe utilizar el llamado coeficiente de atenuación másico  $\mu_m$ .

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

El coeficiente de atenuación másico se expresa en  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

El coeficiente de atenuación lineal es función de la energía de los fotones, y del número atómico y del estado de agregación del absorbente (no produce por ejemplo la misma atenuación el agua en forma líquida que el vapor de agua).

Para fotones monoenergéticos se llama expresión de semirreducción al grosor de absorbente que reduce el flujo de un haz de radiación a la mitad. Se demuestra que el espesor de semirreducción  $X_{1/2}$  vale:

$$X_{1/2} = 0.693 / \mu$$

Igualmente se define el *espesor decimorreductor* como el espesor de absorbente que reduce el flujo del haz emergente a la décima parte del flujo incidente.

Estas definiciones no son válidas para rayos X por el carácter inhomogéneo del espectro, por lo que en este caso se definen los espesores semirreductores o decimorreductores, como los respectivos espesores de absorbente que reducen la tasa de exposición del haz emergente a la mitad o décima parte de la tasa del haz incidente.

### **Calidad y cantidad de un haz de rayos X**

La calidad de un haz de rayos X es un concepto que se refiere a la distribución energética de los fotones, o sea la forma de su espectro. Por otra parte la cantidad alude al número de fotones por unidad de tiempo emitidas por el tubo.

Para comparar haces de radiación y espesores en forma numérica un parámetro que exprese la calidad (íntimamente unida al poder de penetración) para una energía dada, se utiliza el llamado coeficiente de *heterogeneidad*.

Cuando un haz de rayos X incide sobre un absorbente a medida que aumenta su espesor el haz emergente se endurece, debido a que sufre mayor

atenuación la zona de baja energía que la de alta. Por esta razón el haz emergente de una capa hemirreductora requiere otra de mayor espesor que la primera para alcanzar una disminución a su valor mitad de la tasa de exposición.

Para cuantificar este efecto se define el llamado coeficiente de heterogeneidad como el cociente entre la primera y segunda capa hemirreductora.

$$H = \frac{1^{\text{a}} \text{CHR}}{2^{\text{a}} \text{CHR}}$$

cuyo valor es igual a la unidad para fotones monoenergéticos.

En el caso de los rayos X, por el contrario, H es menor que la unidad, tanto menor cuanto más inhomogénea sea la radiación, ya que se compondrán de fotones de muy diferentes energías.

### **Procesos de interacción de los fotones con la materia**

Los principales procesos que contribuyen a la atenuación de un haz de fotones de rayos X de baja energía, son el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

#### **Efecto fotoeléctrico**

En el efecto fotoeléctrico, un fotón interacciona con el átomo invirtiendo toda su energía al arrancar un electrón y comunicarle energía cinética. Es importante destacar que el fotón interacciona con todo el átomo, aunque el resultado sea la expulsión de un único electrón (de ahí la gran influencia del número atómico **Z** en este tipo de procesos).

La interacción fotoeléctrica supone la máxima contribución al coeficiente de atenuación para bajas energías (inferiores a 50 keV para el aluminio y a 500 keV para el plomo).

El coeficiente de absorción lineal fotoeléctrico disminuye aproximadamente con la inversa del cubo de la energía de los fotones, en el intervalo energético de los rayos X de radiodiagnóstico (20-150 keV).

El coeficiente de absorción lineal fotoeléctrico crece aproximadamente con el cubo del número atómico.

#### **Efecto Compton**

Se trata de una interacción que se produce mayoritariamente entre fotones y electrones atómicos poco ligados, tales como los electrones situados en las capas más externas del átomo.

La interacción Compton produce un fotón dispersado, de menor energía que el incidente y un electrón con energía cinética prácticamente igual a la diferencia de energía entre ambos fotones.

Los fotones dispersados en este proceso forman un espectro continuo que se extiende desde energía nula, a cierta energía inferior a la del fotón incidente.

El coeficiente lineal de dispersión Compton varía proporcionalmente con la densidad del medio y disminuye aproximadamente con el inverso de la energía de los fotones primarios.

### **La formación de la imagen radiológica desde el punto de vista de la interacción.**

#### **El número atómico efectivo**

Generalmente, los materiales con los que interaccionan los fotones están formados por varios elementos químicos por lo cual es conveniente definir un *número atómico efectivo* que permita tratar globalmente el material a efectos comparativos con otros absorbentes puros.

El número atómico efectivo juega en mezclas o combinaciones químicas el mismo papel que el número atómico de un elemento químico puro. Resulta así una mayor atenuación de fotones en tejido óseo (contiene calcio,  $Z=20$ ) que en agua o tejido muscular ( $Z=7$ ). De ahí el mayor contraste radiográfico de los huesos respecto al resto de los tejidos blandos.

En ciertos estudios radiológicos, por ejemplo en aparato digestivo, interesa la identificación del tejido estudiado frente a otros tejidos blandos que los rodean. Para conseguir este propósito se utilizan medios de contraste que por ser número atómico alto permiten lograr la diferenciación de densidades. La misma razón explica la utilización de compuesto de Iodo como contraste en urografía o aire en radiografía torácica.

Cuando el propósito no es atenuar radiación, sino filtrarla, se eligen materiales de  $Z$  relativamente bajo, como aluminio.

### **Condiciones de formación de la imagen radiológica**

En el intervalo de energía máxima de los fotones de rayos X utilizados en Radiodiagnóstico, de 20 a 150 keV, los procesos de alteración con materiales biológicos son los efectos fotoeléctrico y de Compton. El primero de ellos representa la absorción total de la energía del fotón,

mientras que en la interacción Compton aparece un fotón dispersado de energía menor o próxima a la del fotón incidente por lo que sólo se produce un depósito parcial de la energía del mismo.

La imagen radiológica se forma con el haz de fotones transmitido por el paciente que alcanza el sistema de registro de imagen. Estos fotones pueden ser, bien los fotones primarios que han pasado a través del paciente sin interactuar, o bien los fotones dispersados originados en los procesos de interacción Compton en el paciente. Los fotones primarios son los que transportan la información útil, ya que su intensidad en cada parte del haz transmitido depende de las diferencias de absorción de los fotones incidentes en los tejidos atravesados.

Desde el punto de vista de la formación de la imagen radiológica, el efecto fotoeléctrico produce imágenes de excelente calidad por dos razones: *en primer lugar porque no origina radiación dispersa y en segundo lugar porque aumenta el contraste natural entre los distintos tejidos*. El contraste en la imagen se debe a que algunos tejidos absorben mayor número de fotones que otros y, por tanto, aumentan cuando las diferencias de absorción en los tejidos adyacentes es grande.

Debido a que las diferencias de absorción por efecto fotoeléctrico dependen de la tercera potencia del número atómico, pequeñas diferencias en la composición química de dos tejidos origina importantes diferencias de absorción. Por otra parte, la probabilidad de que un fotón sea absorbido por efecto fotoeléctrico disminuye rápidamente cuando aumenta la energía de los fotones y en consecuencia el contraste disminuye al aumentar la tensión aplicada al tubo.

Para obtener suficiente contraste, por ejemplo entre la grasa y el músculo o un parénquima glandular, es necesario usar tensiones bajas ( de 25 a 30 kV en mamografía).

Desde el punto de vista de la dosis que recibe el paciente el efecto fotoeléctrico no es deseable puesto que toda la energía de los fotones incidentes es absorbida por las zonas irradiadas del paciente.

Los fotones dispersados son originados mayoritariamente en la interacción Compton y su intensidad aumenta al crecer la energía media del haz y el volumen irradiado. El coeficiente de atenuación lineal por efecto Compton es proporcional al  $Z$ , y por tanto la dispersión Compton produce, menos contraste entre tejidos con distinto número atómico efectivo, que el efecto fotoeléctrico. Además los fotones dispersados en este proceso pueden ser emitidos en cualquier dirección, dando lugar a un velo uniforme sobre la imagen que deteriora su contraste.

La energía depositada en el tejido biológico cuando los fotones interactúan por efecto Compton, es una pequeña fracción de la energía del fotón incidente y por tanto el paciente recibe una dosis mucho menor que el caso de la interacción fotoeléctrica.

En ocasiones, para conseguir que en una misma película se formen imágenes correctas de dos regiones con opacidad radiológica muy distinta, hay que reducir el contraste de la imagen. Esto puede conseguirse utilizando tensiones elevadas o películas cuya densidad óptica varíe más lentamente en función de la exposición. Según el tipo de examen, puede ser preferible detectar en la imagen un gran número de detalles (gran latitud) con poco contraste, o un número menor de detalles con un contraste mayor.

En resumen las interacciones por efecto fotoeléctrico son deseables desde el punto de vista de la calidad de la imagen porque proporciona un alto contraste sin producción de radiación dispersa, pero desafortunadamente la dosis impartida al paciente, localmente, es más alta que cuando se produce la interacción Compton. En consecuencia la elección del kilovoltaje adecuado para la obtención de una imagen radiológica ha de ser un compromiso entre los requerimientos de baja dosis y alto contraste.

Independientemente de la formación de la imagen, hay que tener presente que los fotones dispersados dan lugar a un cierto valor de radiación dispersa en la sala, que es necesario evaluar de cara a la protección radiológica del profesional que opera los equipos.

A todo lo expuesto cabe añadir que de acuerdo con la normativa vigente de optimización de dosis al paciente en Radiodiagnóstico se recomienda la utilización genérica de alto kilovoltaje, donde al predominar la interacción Compton, aunque nosotros no estamos de acuerdo en este criterio de forma generalizada. Los cambios que se observan en la atenuación de fotones se debe únicamente a variaciones de densidad, por lo que el contraste en relación al kilovoltaje óptimo es comparativamente peor.



## MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS

### Introducción

La necesidad de establecer normas de protección contra los efectos biológicos perjudiciales de las radiaciones ionizantes, se hizo patente a los pocos meses del descubrimiento de los rayos X por Röntgen en 1895, y al comienzo del trabajo con elementos radiactivos en 1896.

Como consecuencia del trabajo con radiaciones ionizantes, algunos operadores en este campo comenzaron a manifestar efectos nocivos. El análisis de síntomas patológicos de un conjunto de radiólogos, permitió establecer en 1922 que la incidencia de cáncer en este grupo de trabajo, era significativamente más alta respecto a otros médicos, circunstancia que demostró la peligrosidad de las radiaciones ionizantes y la necesidad de establecer normas específicas de radioprotección, lo que supuso la introducción de magnitudes radiológicas, así como sus correspondientes unidades.

Las magnitudes radiológicas cuantifican los efectos biológicos producidos por las radiaciones, por lo cual es necesario conocer periódicamente sus valores para asegurar que las condiciones de trabajo son suficientemente seguras, y el trabajador se mantiene por debajo de ciertos límites de estas magnitudes.

Es sin embargo necesario definir magnitudes radiológicas preventivas, que adviertan al trabajador del posible riesgo de operación en una determinada zona. Esta misión la cumplen las tasas de las magnitudes radiológicas, definidas como el valor de la propia magnitud por unidad de tiempo.

### Exposición X

Se define esta magnitud como el cociente:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

donde **dQ** es el valor absoluto de la carga total de todos los iones de un mismo signo producidos en el aire, cuando todos los electrones liberados por los fotones absorbidos en la masa **dm** han sido detenidos completamente en el aire.

Las vicisitudes e inconvenientes de esta magnitud, que tuvo una vida dilatada, provienen en gran parte de como ocurrió en otras magnitudes antiguas, se definió antes la unidad que la magnitud.

La definición de la exposición implica una serie de restricciones y dificultades:

- a.- Es una magnitud definida exclusivamente para un haz o campo de fotones (radiación X o gamma) en un periodo específico, el aire.
- b.- El efecto medido es la ionización del aire, cuando la magnitud de importancia radiológica es la energía absorbida.
- c.- Con las técnicas actualmente en uso, es difícil medir la exposición para energías inferiores a unos pocos keV por encima de unos pocos MeV.

La unidad especial de magnitud es el **Rengüenio** definida, como la exposición producida por un haz de radiación X o gamma, que absorbida en 1 cm<sup>3</sup> de aire seco y en condiciones normales (temperatura 0° y presión 760 mmHg) produce por ionización la liberación de una unidad electrostática de carga de ambos signos.

La unidad en el **SI** de exposición es el **culombio/kg**, y carece de nombre especial, circunstancia debida a que la magnitud dejará de usarse en breve ante las dificultades que presenta.

**Las equivalencias entre ambas unidades son:**

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$
$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$$

**Se define además la tasa de exposición como:**

$$X = \frac{Dx}{dt}$$

donde **dx** es el incremento de exposición durante el intervalo de tiempo **dt**. La tasa de exposición se expresa en **R/s** o **C/kg.s** Las unidades de tiempo día (d) hora (h) y minuto (min) pueden usarse en el **SI**.

### **Kerma**

El nombre de esta magnitud radiológica, acronimo de la definición breve inglesa (Kinetic Energy Released for Unit Mass), se define como el cociente:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

donde **dE<sub>tr</sub>** es igual a la suma de todas las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, en una material de masa **dm**

La unidad **SI** de **Kerma** es el *julio/kg* cuyo nombre es el *Gray (Gy)*

$$1\text{Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

La unidad especial de kerma es el Rad, cuya relación con la unidad SI es

$$1 \text{ Rad} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 1 \text{ cGy}$$

El kerma es una magnitud característica de un campo de partículas no cargadas (neutrones y fotones). Se ha recomendado sustituir la exposición, magnitud tradicional, pero con defectos intrínsecos graves, por el Kerma en aire.

Se define la tasa de Kerma, **K**, como el cociente  $d\mathbf{K}/dt$ , donde  $d\mathbf{k}$  es el incremento de Kerma en el intervalo de tiempo  $dt$ .

La unidad especial de tasa de kerma es el Rad/s y la SI el Gy/s. La relación entre ambas se expresa en la forma siguiente

$$1 \text{ Rad/s} = 10^{-2} \text{ J/Kg.s} = 10 \text{ mGys}$$

### Dosis absorbida

Se define esta magnitud como el cociente:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

donde  $dE$  es el valor medio de la energía cedida por la radiación absorbida por una cantidad de masa  $dm$ .

Las unidades **SI** y especial de dosis absorbida, Gray y Rad, y las correspondientes tasas de magnitud, ya han sido definidas al hablar de Kerma.

La dosis absorbida es la magnitud de dosimetría de más interés, resulta válida para cualquier tipo de radiación y requiere la especificación del material en el que se produce la interacción.

A fin de concretar lo más posible la naturaleza de las magnitudes definidas se va a examinar seguidamente la relación existente entre el Kerma y la dosis absorbida.

Si se considera una pequeña cantidad de materia aislada sobre la que incide la irradiación gamma, la suma de energías cinéticas de todas las partículas cargadas liberada componen el Kerma, pero tan sólo una fracción de esta energía quedará absorbida en la masa de referencia, la dosis absorbida. En estas condiciones el Kerma será siempre mayor que la dosis.

En cambio, si la muestra de masa elegida está rodeada de una gran cantidad de masa de idéntica naturaleza, la energía que escapa del elemento de masa **dm**, puede venir compensada por otras partículas que procedentes de la materia circunvecina penetran en **dm**. Si se produce esta circunstancia (equilibrio electrónico) y es despreciable la producción de Bremsstrahlung, el Kerma y la dosis absorbida son iguales.

Como en casos anteriores se define la tasa de dosis absorbida **D**, como el cociente  $dD/dt$ , donde **dD** es el incremento de dosis absorbida durante el intervalo de tiempo **dt**:

$$D = \frac{dD}{dt}$$

y se expresa en Gy/s, Gy/min o Gy/h.

### Dosis equivalente

Según se ha podido comprobar en estudios sobre efectos biológicos de la radiación, la dosis absorbida en un tejido orgánico no determina completamente el efecto biológico resultante, intervienen otros factores tales como naturaleza de la radiación, energía y espectro de la radiación, tipo de efecto biológico, etc.

Por esta razón los radiobiólogos han dirigido sus esfuerzos en la definición de una nueva magnitud, que pudiera tomar en cuenta la pluralidad de efectos indicada. Tal magnitud es la dosis equivalente **H**, definida como:

$$H = D \cdot Q$$

donde **Q** es *el factor de calidad* promediado que depende de la transferencia lineal de energía. Para la radiación electromagnética, **Q = 1**

Al ser adimensional, el factor de calidad, **Q**, la dosis equivalente se mide en el SI en J/kg, unidad a la que se le denomina *Sievert (Sv)*. Por otra parte se usa aún una unidad especial, el rem, cuya equivalencia es

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10 \text{ cSv}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

La *tasa de dosis equivalente, H*, se define como el cociente  $dH/dt$ , donde **dH** es el incremento de dosis equivalente en el intervalo temporal **dt**. Las unidades suelen ser Sv/h o rem/h

### Dosis efectiva

Esta magnitud representa la media ponderada de las dosis equivalentes recibidas en distintos órganos y viene dada por la expresión

$$H_e = \sum W_i H_i$$

Donde  $W_i$  es el factor de ponderación para el órgano  $y$ , que representa la proporción de riesgo estocástico resultante de la irradiación del tejido  $y$ , respecto al riesgo total cuando la totalidad del organismo es irradiado uniformemente, y  $H_i$  es la dosis equivalente recibida por el tejido  $i$ .

Los valores de los factores de ponderación se agrupan en la siguiente tabla

Tejidos	Wt
Gónadas	0.25
Mama	0.15
Médula ósea	0.12
Pulmón	0.12
Tiroides	0.03
Hueso (superficial)	0.03
Resto de órganos	0.30

## Relaciones entre magnitudes radiológicas

### Relación Exposición-Dosis absorbida

El paso de exposición en aire a valores de dosis absorbidas en determinados materiales, especialmente tejidos biológicos se hace, a través del factor  $f$ , según la relación

$$D = f.X$$

El factor  $f$  en función de la energía, para tejidos biológicos típicos.

Para el agua, aire y tejido blando  $f = 1$  lo que significa que, aproximadamente, una exposición de 1 R equivale a una dosis absorbida de 1 Rad.

Cuando se pretende estimar la dosis a la entrada de los pacientes a partir de la medida de la exposición, debe tomarse también en consideración el factor de retrodispersión que tiene en cuenta el exceso de dosis que se produce como consecuencia de los fotones retrodispersados (dispersión en ángulo próximo a  $180^\circ$  respecto a la dirección del fotón primario) por el tejido. Este factor puede valer entre 1.10 y 1.50 dependiendo de la energía de los fotones y del tamaño del campo irradiado.

## Aspectos generales referidos a todas las magnitudes

Todas las magnitudes radiológicas anteriores (exposición, Kerma, dosis absorbida, y dosis equivalente) se definen para cada uno del material irradiado.

Si se asigna un determinado valor de dosis a un órgano o tejido, debe entenderse que se trata del valor promedio de la dosis en todo su volumen.

## Dosis superficial y dosis profunda

Teniendo en cuenta que los rayos X de radiodiagnóstico tienen energías relativamente bajas, el efecto principal de absorción en tejido blando se realiza en capas vecinas a la piel, por lo que las zonas más profundas se afectan mucho menos. Por esta razón en radioprotección, la dosis se diferencia entre *dosis superficial o dosis piel y dosis profunda*.

## El factor de retrodispersión

Al sufrir irradiación de rayos X un tejido biológico, la dosis recibida procede en parte de la acción directa de la radiación y de otra, de fotones retodispersados en tejidos más profundos que el considerado. Por ello, la *dosis músculo a la entrada* (DME) (o dosis entrada), se define según:

$$\text{DME (cGy o Rad)} = 0.869 \cdot X \text{ (R)} \cdot f_r$$

donde **X** representa la exposición en Renguenios medida a la entrada del haz en el tejido y  $f_r$  el factor de retrodispersión, que es función de la filtración, del kVp y del tamaño del campo, y varía entre 1.2 y 1.45.

Es interesante destacar que se puede determinar la dosis en cada órgano concreto a partir de la dosis a la entrada y de los factores de retrodispersión y de conversión de exposición a dosis en ese tejido, así como la profundidad a la que se encuentran los tejidos que componen el órgano.

## Dosis a la entrada y dosis en órganos

Se llama dosis a la entrada a la que se mediría con un dosímetro situado en la zona de la superficie de la piel de un paciente sobre la que incide el haz de radiación.

Se llama dosis en órgano a la dosis promedio de las recibidas en los diferentes elementos de volumen que componen ese órgano.

En ciertas exploraciones de radiodiagnóstico, como por ejemplo urografía o tránsito esófago-gastroduodenal, no es posible controlar de forma directa la dosis a la entrada ni estimar por tanto, la dosis equivalente

efectiva, debido a que el campo de radiación está continuamente cambiando tanto en dimensión como en localización.

En estos casos, se utilizan unos detectores especiales (cámaras de ionización equivalentes a aire libre) que colocados justamente en el cabezal del tubo de rayos X y sin influir en su utilización, permiten dar información del producto dosis por área, de forma que sus lecturas vienen dadas en  $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  o  $\text{mGy}\cdot\text{cm}^2$ .

Con estas lecturas y conociendo las dimensiones del campo de radiación y las distancias desde el foco a la cámara y de ésta a la superficie de la piel del paciente, se puede tener la misma información de dosis a la entrada y por tanto, la dosis en cada órgano o tejido concreto en esa exposición.

### **Dosis integral**

Dado que la dosis absorbida se define como la energía depositada en un elemento de masa, la energía total impartida por la radiación al interactuar con un material, se podrá calcular como la suma de los productos de las dosis en cada elemento de masa por los valores de esos elementos de masas. Esta magnitud recibe el nombre de *dosis integral* (o integrada).

Si la dosis es constante en todo el material, la dosis integrada es el producto de la dosis por la masa irradiada. La dosis integral, o energía impartida, se mide en julios (J).

## Características de equipos y haces de rayos X

### Introducción

Los rayos X así como los dispositivos para su generación y utilización siguen siendo, un siglo después de su descubrimiento, una herramienta fundamental de radiodiagnóstico. El mejor conocimiento actual de este tipo de radiación persigue alcanzar dos objetivos: *obtención de imágenes de calidad óptima y minimizar razonablemente la dosis recibida por el paciente.*

El método habitual para realizar una radiografía consiste en situar una fuente de rayos X a un lado de la zona anatómica y radiografiar, y al otro un detector adecuado, en este caso una película radiográfica, contenida en un chasis apropiado con una cara frontal suficientemente fina, para permitir fácilmente el paso de la radiación.

En estas condiciones se activa la generación de rayos X durante una fracción de tiempo apropiada, y como los rayos X se propagan en línea recta, se forma en la película una imagen de la zona radiografiada, semejante a las imágenes de sombras que se producen con luz visible que incide sobre un objeto que presenta variaciones de transparencia.

Seguidamente la película impresionada se procesa, esto es, se revela, fija, lava y seca. La radiografía obtenida presenta ya una imagen física, donde las diferencias de intensidad de radiación que recibió la película durante su exposición se transforma en niveles de ennegrecimiento.

Cuando se coloca la radiografía sobre una pantalla iluminada (negoscopio), la imagen puede ser observada y sus detalles relacionados con estructuras normales o alteraciones patológicas.

Las condiciones de alta calidad de la cadena radiográfica son:

#### **Imagen nítida**

En las que las zonas de separación en los distintos detalles de imagen, quedan definidas por cambios bruscos de grado de ennegrecimiento.

#### **Contraste adecuado**

Ofrece una amplia gama de grises entre el blanco y el negro

#### **Capacidad de generación de haces de rayos X**

Con una amplia gama de calidad, adaptadas a la radiografía de estructuras anatómicas diversas.



### **Posibilidad de tiempos de exposición muy cortos**

Que eviten en la radiografía la penumbra cinética (órganos en movimiento).

### **Capacidad de efectuar disparos repetidos**

A cadencia suficientemente alta, para obtener series rápidas de imágenes.

### **Capacidad de disipar temperaturas muy elevadas**

## **Elementos básicos de un tubo de rayos X**

Un tubo de rayos X es un dispositivo relativamente simple que consta de una ampolla de vidrio en donde existe un vacío muy elevado y en el que alberga dos electrodos, uno de polaridad negativa o cátodo, que tiene forma de filamento, análogo al de una lámpara incandescente, y el otro de polaridad positiva, ánodo o anticátodo, entre los cuales existe una diferencia de potencial del orden de Kv. Al ponerse incandescente el filamento bajo la acción de una fuente de tensión auxiliar, se emiten electrones que acelerados por el campo eléctrico, impactan sobre el ánodo invirtiendo parcialmente su energía en rayos X.

La zona de impacto del ánodo o anticátodo, donde se frenan los electrones y se emiten los rayos X, se llama foco.

El vacío es extraordinariamente importante, la presencia de aire en el tubo daría lugar que los electrones al chocar con las moléculas de aire, no alcancen la velocidad máxima requerida, y el filamento se deteriore por oxidación.

Gran parte de la energía suministrada al tubo (normalmente más de un 99%) se disipa en colisiones inelásticas de los electrones con los átomos del material anódico, con la consiguiente producción de calor y elevación de temperatura del ánodo. El resto de energía, menos del 1%, induce colisiones radiativas y se convierte en rayos X.

## **Componentes de un tubo de rayos X**

En la figura adjunta se esquematizan los diversos componentes de un tubo de rayos X, y se describen cada uno de sus componentes.

### **El filamento**

Este componente tiene una estructura análoga al filamento de ciertas lámparas de incandescencia: un arrollamiento helicoidal de hilo de wolframio (0,2 mm de diámetro), con una altura aproximada de 1 cm y un radio de 0.5mm. El metal del filamento es wolframio, debido a su buena

emisividad termoiónica, punto de fusión muy elevado (3400°C) y baja tasa de evaporización.

El filamento es llevado a incandescencia mediante una baja tensión ajustable (= 10V) que permite variar su temperatura, y en consecuencia, la tasa de emisión de electrones.

Una gran parte de tubos de rayos X utilizados en radiodiagnóstico suelen tener dos filamentos de diferente tamaño, buscando el compromiso entre tamaño mínimo de foco (imágenes más nítidas) y una mayor potencia de operación (tiempo de disparo más corto).

### **El electrodo de concentración: foco térmico y foco efectivo**

Un tubo de rayos X emite un haz divergente de radiación que se dirige a través de una determinada zona anatómica de un sujeto a una película fotográfica, normalmente contenida en un chasis. El haz de rayos X es absorbido de forma diferencial por los distintos tejidos y órganos del sujeto y produce una imagen de sombras en la película.

Si el haz de radiación tuviera su origen en una fuente puntual, entonces cada punto de la zona irradiada del paciente se registraría en la imagen como otro punto, con lo cual las líneas de separación entre las imágenes de distintas estructuras serían completamente nítidas.

Sin embargo, cuando el foco tiene una superficie finita, las líneas de separación de estructuras en la imagen no son nítidas sino forman unas bandas de penumbra, tanto más anchas cuanto mayor sea la superficie focal y, la distancia objeto-imagen, y menor cuanto más corta sea la distancia foco-placa fotográfica. Se dice entonces que la imagen presenta *penumbra geométrica*.

En la práctica, los electrones emergen del filamento siguiendo trayectorias divergentes y para que impacten en una superficie anódica razonablemente pequeña, se dispone rodeando el filamento, un componente llamado *electrodo o cúpula de concentración*, que al tener una polaridad negativa respecto al filamento, concentran el haz de electrones de forma que impactan sobre el ánodo en una pequeña superficie llamada *foco térmico*.

No obstante, considerando la forma del filamento, el foco térmico dista mucho de ser puntual, por lo cual se recurre al artificio de inclinar la superficie anódica un ángulo de 30° respecto a la vertical, con lo cual, el efecto efectivo o imagen del foco térmico observada en la dirección de emisión es sensiblemente menor y en consecuencia se alcanza una mayor calidad de imagen al disminuir la penumbra geométrica.

### **El ánodo o anticátodo**

Es la zona de impacto de los electrones (foco térmico) cuya superficie es del orden de pocos milímetros cuadrados y se alcanzan temperaturas que llegan a los 2000° C. Esta circunstancia plantea dos problemas importantes: la selección de un metal que soporte tan elevadas temperaturas sin fundirse, y un método eficaz de disipar el calor generado.

En gran parte de casos, los ánodos de los tubos de rayos X de Radiodiagnóstico suelen ser de wolframio, debido a la circunstancia favorable de que el rendimiento de producción de rayos X crece con el número atómico del blanco, aunque ésta no es la única condición requerida, la temperatura de fusión del blanco es un parámetro de importancia en la selección del metal adecuado. El wolframio debido a su baja tasa de evaporación y punto de fusión elevado, propiedades ya citadas al hablar del filamento, dan ventajas ostensibles a este metal frente a otros materiales con número atómico mayor.

La problemática de la disipación del calor anódico se soluciona de dos formas distintas. En la configuración del ánodo estacionario el ánodo está formado por una pieza de cobre en la que va montada una plancha de wolframio en la zona de impacto de los electrones. El calor se conduce al exterior mediante una barra de cobre provista de aletas de refrigeración.

Los tubos de ánodo estacionarios se usan sólo en un número limitado de aplicaciones, estos dispositivos presentan problemas importantes debido a su incapacidad de funcionar con altas intensidades de corriente, existiendo una limitación de potencia utilizada para evitar que el tubo sufra daños irreversibles.

Esta circunstancia plantea un problema importante. Si se desea que la radiografía presente gran nitidez es condición necesaria que el tamaño de foco sea pequeño, y entonces se requiere disminuir la corriente del tubo y aumentar el tiempo de exposición situación que puede producir una difusibilidad de contornos en la radiografía, debido a movimientos involuntarios del paciente respecto a la película, que recibe el nombre de ***penumbra cinética***.

Todo lo expuesto pone de manifiesto las dificultades que existen si se desea obtener una radiografía con foco pequeño, tiempo de exposición corto, y una intensidad elevada de emisión utilizando un tubo con ánodo fijo.

La solución general a estos problemas se alcanzan mediante los llamados tubos de ánodo giratorio.

En estos tubos el ánodo consiste en un disco de wolframio en forma de plato, de alrededor de 10 cm de diámetro que puede girar a gran velocidad de 3000 a 9000 revoluciones por minuto. La rotación se produce

mediante un motor, cuyo rotor se encuentra en la zona de vacío, y las bobinas del estator se encuentran en el exterior de la ampolla.

El disco de wolframio tiene su borde en bisel, para conseguir como en los tubos de ánodo fijo, reducir convenientemente el área del foco efectivo. La rotación del disco desplaza continuamente la zona de impacto electrónico, con lo cual se puede mantener un foco efectivo muy pequeño, ya que el área de disipación térmica es mucho mayor.

La eliminación de calor del disco no puede hacerse por conducción a través del eje del motor, pues entonces se comprometería seriamente el funcionamiento de los cojinetes del sistema, por lo cual se hace, exclusivamente, por radiación, favorecida por la elevada temperatura, unos 2000°C, que alcanza el disco durante el disparo del tubo.

En un tubo de rayos X, la intensidad de radiación no es uniforme en la zona cubierta por el haz.

Este fenómeno llamado efecto anódico o efecto tacón hace que la intensidad de emisión de rayos X no sea uniforme, acusándose mucho más en los bordes del campo.

El efecto anódico se acentúa cuando en la superficie del ánodo existen irregularidades, por lo cual en un tubo nuevo, tal superficie se encuentra totalmente pulida. Este efecto tiende a crecer a medida que envejece el tubo, al agrietarse la superficie anódica debido a los procesos cíclicos de calentamiento y enfriamiento: *tal degradación es más rápida si el tubo trabaja frecuentemente a cargas elevadas, o se requieren disparos repetidos a cadencia alta.*

Una forma de aumentar la duración del ánodo consiste en emplear, en lugar de wolframio puro una aleación de este metal y renio (90 y 10% respectivamente).

La intensificación paulatina del efecto anódico con importante repercusión en la pérdida de calidad de las radiografías es una de las causas que obligan a la sustitución del tubo.

## **Curvas de carga**

Para garantizar el funcionamiento de un tubo de rayos X en buenas condiciones, y evitar situaciones que podrían producir averías graves, conviene conocer las limitaciones de ciertos parámetros tales como:

### **Kilovoltaje máximo**

Depende de las características físicas del tubo (distancia ánodo-cátodo, forma de la estructura anódica y catódica) y del generador (forma de onda, tipo de rectificación).

#### **Intensidad máxima de corriente**

Depende de las limitaciones de tensión y corriente eléctricas aplicables al filamento.

#### **Máxima energía calorífica disipable**

Está relacionada con las características físicas del tubo (tamaño del foco, ánodo) y de la zona circundante (aceite y coraza).

Los valores límites de las magnitudes críticas vienen especificadas por el fabricante para cada tipo de tubo, y se ofrecen al usuario en forma de gráficos llamados curvas de carga, representándose en ordenadas la intensidad del tubo (miliamperaje) y en abscisas el tiempo de exposición en segundos: los números que figuran en cada una de las curvas corresponden al kilovoltaje en funcionamiento.

Si el punto de trabajo elegido para un kilovoltaje determinado (por ejemplo para 100 Kv, con  $T=0.1s$  y  $Y = 900 \text{ mA}$ ) cae por encima de la curva de carga (zona de destrucción) el tubo sufre daños que pueden oscilar entre un acortamiento acentuado de su vida al aumentar intolerablemente el efecto anódico, hasta una metalización interna de la ampolla producida por evaporización del wolframio anódico. Si en cambio  $Y = 500 \text{ mA}$ , el punto de trabajo se encontraría en la parte inferior de la curva, en la llamada zona de operación, en la cual debe trabajar siempre el tubo para evitar su destrucción o utilización prematura.

Los actuales equipos llevan en su microprocesador los datos de las curvas de carga, de forma que si se intenta trabajar en la zona de destrucción se enciende un piloto rojo que advierte al operador la imposibilidad del disparo en las condiciones seleccionadas.

Otra peculiaridad de los tubos de rayos X actuales es la posibilidad de trabajo en miliamperaje elevado, ventaja ligada al hecho que cuanto más alta sea la tasa de emisión de radiación, se requiere un tiempo más corto para realizar una buena radiografía.

Este hecho es importante en el caso que se deban radiografiar órganos que requieren tiempos largos de exposición para conseguir un buen contraste en la película y, en particular cuando se está radiografiando a un paciente que no colabore (niños o disminuidos físicos). Un haz intenso de rayos X permite disminuir los tiempos de exposición y evita los riesgos de movimiento del paciente respecto a la película, lo cual produce en la imagen de penumbra cinética.

### **La coraza**

La emisión de rayos X de un tubo generador se realiza en todas las direcciones, situación que produciría un aumento intolerable de radiación dispersa, lo que plantearía problemas importantes de radioprotección, y ocasionaría una grave pérdida de calidad en las radiografías.

Por esta razón, la ampolla del tubo va completamente rodeada por un blindaje de plomo, llamado coraza, que permite que el escape de la radiación del tubo sea únicamente por una ventana, atenuando hasta niveles admisibles la emisión de rayos X en otras direcciones.

La coraza tiene además otra misión importante y es el mantener una capa de aceite alrededor de la ampolla, cuya misión es homogeneizar la temperatura del vidrio; en ausencia del aceite, durante los disparos, la diferencia de temperatura entre los puntos de paso de los conectores y otras zonas de la ampolla podrían provocar su destrucción.

## **Dispositivos asociados al tubo de rayos X**

### **El generador de alta tensión**

Prácticamente todos los tubos de rayos X se alimentan a partir de la red de energía eléctrica (220 V corriente alterna) y mediante un transformador adecuado se eleva un transformador adecuado se eleva la tensión hasta el valor deseado, en Radiodiagnóstico entre 30 y 150 kV. Obviamente esta alta tensión conserva la misma variación en función del tiempo.

Aunque en principio un tubo de rayos X podría funcionar con esta tensión alterna, (y así se hace en ciertos tubos autorrectificados) tal proceder no es aconsejable ya que en los ciclos en que el filamento tuviera tensión positiva y no se emitieran rayos X los electrones emitidos por el ánodo (que adquiere una elevada temperatura en el foco) bombardearían el filamento ocasionando su destrucción a corto plazo.

Para evitar tal posibilidad se rectifica la corriente, eliminación de las ondas negativas o rectificación de media onda.

La rectificación de media onda ofrece el inconveniente que el tubo permanece inactivo la mitad del tiempo de disparo: para evitarlo se aplica un método de rectificación (onda completa) donde se invierten los ciclos negativos de la onda. Este método ofrece ya la ventaja que se reduce mucho el rizado o variación periódica del kilovoltaje con el tiempo, pero esto no resulta aún completamente satisfactoria, ya que periódicamente la tensión desciende a cero, lo que propicia un incremento indeseable en la generación de rayos X de baja energía

(rayos X blandos), y disminuye tanto el rendimiento de generación de rayos X, como la proporción de fotones de alta energía.

Por estas razones se prefiere utilizar corriente trifásica, que una vez elevada desde la tensión de la red al kilovoltaje requerido se rectifica bien a onda simple o doble onda: *en ambos casos se aprecia la reducción del rizado lo que redundará en una mejora muy apreciable.*

Los generadores de los tubos actuales se basan en un sistema multipulso basado en un generador de ondas cuadradas de elevada frecuencia que producen ya un rizado insignificante.

El kilovoltaje medio aplicado a un tubo de rayos X por un generador trifásico o multipulso es más alto que para una unidad monofásica debido a las diferencias en la forma de onda. Por consiguiente, el cambio de un generador monofásico a otro trifásico, tiene un efecto sobre la energía media del haz de rayos X, en el que el generador trifásico proporciona rayos X cuya energía media es más elevada.

### **La consola de mandos**

La operación de un tubo de rayos X se realiza desde la consola de mandos, unidad que se sitúa en una zona especialmente blindada para reducir la tasa de dosis que deben recibir los operadores durante el disparo del tubo a valores inferiores a 10  $\mu\text{Sv/h}$ . El recinto de la consola estará dotado de una ventana de vidrio plomado para poder observar continuamente al paciente durante el disparo del tubo.

### **Básicamente, un equipo de rayos X tiene tres controles:**

- El potencial de aceleración (kilovoltaje)
- La corriente del tubo (miliamperaje)
- El tiempo de disparo durante el cual circula corriente por el tubo y existe por tanto emisión de rayos X

Se utilizan diferencias de potencial en radiodiagnóstico en el rango de los miles de voltios (20-150 kV) y corriente del orden de miliamperios.

## **Variables que influyen sobre la forma e intensidad de los espectros de rayos X**

### **Tensión de operación (kV)**

Si representáramos gráficamente la variación del espectro energético de fotones de rayos X con el kilovoltaje aplicado, en un tubo de rayos X de ánodo de wolframio. Se observarían como ejemplos típicos los espectros correspondientes a 50,80 y 110keV; se observarían en todas ellas que su

límite energético coincide numéricamente, en keV, con la tensión aplicada al tubo en Kv. Igualmente crece la cantidad (intensidad de emisión de fotones) con el kilovoltaje ya que el rendimiento de producción de rayos X crece aproximadamente con el cubo de la tensión eléctrica aplicada al tubo.

Por el contrario, y teniendo en cuenta que la energía de ligadura de los electrones K del W es de 69.5 keV, para menores energías de excitación, el espectro presenta exclusivamente radiación de frenado, para una tensión de operación de 50 KeV. Si esta tensión alcanza 80 KeV, en el espectro de emisión comenzarán a observarse las líneas características del W, que ya aparecen en forma prominente en el espectro correspondiente a 110 keV.

De todo lo expuesto se concluye que al aumentar el kilovoltaje de un tubo el espectro se desplaza en el sentido de aumento de energía máxima y en consecuencia aumenta su penetración. Esta propiedad permite al usuario de un tubo de rayos X seleccionar el kilovoltaje más adecuado a cada zona anatómica a radiografiar. En cambio, el espectro característico que depende exclusivamente del material anódico, o no aparece o caso de hacerlo, sus líneas se observan siempre a la misma energía.

### **Intensidad (miliamperaje)**

El miliamperaje o intensidad de corriente que circula durante la operación de un tubo de rayos X, que se regula variando la tensión de caldeo del filamento, determina la intensidad de emisión de rayos X del tubo. El efecto de esta variación con intensidades de corriente  $I_1 > I_2 > I_3$ ; debemos hacer notar que aunque se modifica de esta forma la intensidad de emisión, en cambio permanece invariable la calidad, si permanece constante la tensión aplicada al tubo.

### **El material anódico**

La forma de espectro y la intensidad de emisión de rayos X depende mucho del material constitutivo del ánodo. Por una parte en condiciones de igualdad de tensión y corriente de operación varían sensiblemente con la naturaleza del metal anódico.

Por otra parte, se observan diferencias muy marcadas en la relación de intensidad de los espectros de frenado y característicos al variar el metal anódico.

### **Radiación de fuga**

Los rayos X que se producen, aunque tienen cierta direccionalidad, esto es, emergen preferentemente en el cono del haz directo, se emiten en cantidad importante en todas direcciones y por eso es necesario blindar todo el tubo excepto la ventana de salida del haz útil. El contenedor o coraza del



tubo es complicado, porque además de actuar como blindaje debe incluir los pasos para las conexiones eléctricas, el aceite de refrigeración, dispositivo de rotación del ánodo, etc.

El espesor del blindaje de la coraza en principio debería tener un espesor tal que atenuara a nivel muy bajo la radiación generada en el tubo y que no forma parte del haz primario. Sin embargo, el peso del tubo sería excesivo y requeriría un dispositivo complicado para situarlo en cada una de las posiciones que requieren las distintas variantes radiográficas.

Por ello, el blindaje utilizado no puede tener un espesor excesivo, en consecuencia permite que escape a su través una fracción de los fotones generados, pertenecientes a la zona espectral de mayor energía. Este tipo de emisión recibe el nombre de radiación de fuga.

En los tubos de radiodiagnóstico, es preceptivo que en condiciones de máxima carga, a 1 metro de distancia del foco, la tasa de kerma en aire de la radiación de fuga no debe exceder de 1 mGy/h.

A la suma de la radiación de fuga y dispersa se denomina radiación secundaria.

### **La filtración del haz de rayos X**

Los espectros de rayos X emitidos por los tubos de radiodiagnóstico se extienden desde muy bajas energías (rayos X muy blandos), hasta una energía en keV numéricamente igual al kilovoltaje de operación. La presencia de rayos X muy blandos presenta el grave inconveniente de producir una elevada dosis piel al paciente sin contribuir en modo alguno a la formación de la imagen.

Este inconveniente se evita mediante la filtración del haz primario con absorbentes adecuados que producen una atenuación mucho más importante en la zona de baja energía del espectro, donde se aprecia la atenuación selectiva causada por filtros de aluminio de 0.5, 2.5 y 4.5 mm de espesor.

Los rayos X que emergen del tubo deben cruzar la ampolla de vidrio y la capa de aceite del refrigerante, situación que produce ya una atenuación del espectro de rayos X en su zona de menor energía, efecto denominado filtración inherente. Desde el punto de vista de utilización en Radiodiagnóstico esta filtración no resulta suficiente con lo que se complementa con filtros adicionales (usualmente de aluminio) que configuran la llamada filtración añadida.

Los valores recomendados de espesores absorbentes requeridos en Radiodiagnóstico, describen los siguientes valores expresados en mm de aluminio, equivalentes a la suma de la filtración inherente y añadida.

- Por debajo de 50 kV 0.5mm Al
- Entre 50 y 70 kV 1.5 mm Al
- Por encima de 70 kV 2.5 mm Al

## **Características de la radiación producida por los tubos de rayos X**

Desde el punto de vista de la generación, modificación y propiedades de la radiación existente en una sala de rayos X durante el disparo del tubo se distinguen las siguientes variantes:

### **Radiación primaria**

Se llama radiación directa o primaria a la que emerge del tubo de rayos X en la dirección de utilización, es decir, a la que se emplea para radiografiar al paciente. El haz de radiación directa tras cruzar al paciente recibe el nombre de *haz residual*.

### **Radiación dispersa**

La radiación dispersa se genera como consecuencia de colisiones Compton de los fotones del haz directo, son absorbentes interpuestos en su trayectoria, tales como el propio paciente, o los accesorios del sistema de imagen (rejilla antidifusora, chasis, pantallas, película, paredes o mobiliario de la sala, etc.) e incluso el propio aire.

## **Influencia de la radiación secundaria en la calidad de las radiografías y la dosis recibida por los pacientes**

La radiación dispersa producida por el haz primario en especial la generada al atravesar el cuerpo del paciente contribuye al aumento del nivel de radiación de la sala, y produce un aumento en la dosis integral del paciente que aumenta con la superficie del haz. Por otra parte, esta radiación al interactuar con la placa fotográfica produce una marcada degeneración en la calidad de la imagen, al producirse una radiación de contraste al crecer el efecto nieve en la placa procesada.

En condiciones normales en Radiodiagnóstico, la radiación directa tiene una intensidad entre 3000 y 300 veces mayor que la dispersa. El valor en cada caso concreto depende tanto de la calidad del haz como del número y constitución de los dispersores, pero en todo caso de no adoptar precauciones especiales, los efectos citados en la placa, sala y paciente pueden llegar a ser muy importantes.

Los factores que contribuyen a aumentar la proporción de radiación dispersa que llega a la película con el volumen irradiado del paciente, el

tamaño del campo y el kilovoltaje. En los tres casos la radiación dispersa aumenta cuando lo hacen dichos parámetros.

Cualquier objeto interpuesto en la trayectoria del haz constituye una fuente potencial de radiación dispersa siendo el paciente la fuente principal en diagnóstico. El resto de las fuentes están indicadas en la figura adjunta y comprende la coraza, los colimadores, la mesa, el chasis y el suelo de la sala.

Para reducir la interferencia de la radiación dispersa en la imagen radiográfica existen distintos métodos entre los cuales los de mayor utilización son:

### **Reducción de la tensión de operación**

En las imágenes radiográficas, los valores de la tensión de operación, la intensidad de corriente y duración del disparo son los parámetros que condicionan la densidad óptica de la imagen. La tensión de operación controla esencialmente la penetración del haz y el contraste de la radiografía, por lo cual, en principio una disminución de la tensión del tubo mejorará el contraste, pero en cambio disminuirá la penetración del haz.

En general la técnica radiográfica, con un kilovoltaje lo más bajo razonablemente posible, implicará en la radiografía un mejor contraste y una reducción del nivel de radiación difusa ya que en estas condiciones resultan favorecidas las interacciones fotoeléctricas frente a las Compton.

Las ventajas indicadas vienen desfavorablemente acompañadas de una dosis mayor al paciente, por lo cual se tiende a la operación con tensiones altas, que producen una dosis mucho menor al paciente, pero en cambio, el contraste de la placa es mucho menor.

### **Compresión de tejidos**

Esta técnica se utiliza con relativa frecuencia para disminuir el espesor de la zona anatómica que se desea examinar. Se usa por ejemplo en mamografía y requiere el adecuado instrumento de compresión. Esta modalidad de operación presenta las ventajas adicionales de alcanzar una buena inmovilización del paciente, producir una exposición más uniforme, mejor la nitidez (menor distancia, tejido película) y disminución significativa de la intensidad de radiación dispersa al reducirse el espesor del tejido irradiado.

### **Aumento de la distancia paciente-película**

La radiación dispersa se genera mayoritariamente en el cuerpo del paciente, y su energía media es menor que la del haz primario, por lo cual, si

se incrementa la distancia paciente-película disminuirá el número de fotones dispersos que alcanzan la placa. Este método tiene como desventaja esencial la amplificación de la imagen radiográfica, lo que no es deseable en muchos casos.

### **Limitación del tamaño del campo**

El nivel de radiación dispersa generado en el propio paciente aumenta al hacerlo el volumen orgánico irradiado, por lo cual el haz de rayos X en una radiografía debe reducirse a un tamaño de campo que se corresponda con la zona de interés. Si el haz se encuentra abierto más de lo necesario cubriendo un campo superior al requerido se producen los siguientes efectos desfavorables:

- 1.- Se irradia un mayor volumen del paciente con lo que se incrementa innecesariamente la dosis integral y se produce una cantidad mayor de radiación difusa.
- 2º.- Fotones como los B incrementan el nivel de radiación en la sala, lo cual afecta al personal de la instalación.
- 3.- La radiación secundaria representada por los fotones C se superponen al haz directo, ocasionando pérdida general de contraste en la radiografía.

Los sistemas de limitación de campo pueden ser de varios tipos, entre los cuales los más usados son:

#### **Limitadores de apertura fija**

En este grupo se incluyen los diagramas, conos y cilindros. Los conos tienen el inconveniente de presentar una penumbra importante con relación a los cilindros. Los diagramas se emplean con frecuencia en cefalometría.

#### **Colimadores de apertura variable**

Los limitadores están formados por dos pares de placas de plomo planas, con movimiento independiente de apertura y cierre de cada par opuesto, por lo cual debe seleccionarse un campo rectangular de lados variables.

El sistema descrito incorpora también un indicador luminoso del campo cubierto por el haz mediante una lámpara L que emite luz sobre un espejo inclinado E, de forma que la imagen que se proyecta en la mesa coincidiría con la originada si la lámpara se encontrara en el foco del tubo.

Naturalmente se requiere la realización de comprobaciones periódicas de coincidencia de campos luminosos y de rayos X: caso contrario se producirían radiografías cortadas o se irradiarían innecesariamente áreas del paciente vecinas a las de interés.

### **Rejillas antidifusoras**

La rejilla antidifusora es un dispositivo que colocado entre el paciente y la película radiográfica absorbe una fracción importante de la radiación difusa, lo que redundaría en una mejora ostensible de la calidad de imágenes.

Este dispositivo está constituido por láminas muy finas de plomo, dispuestas en forma alternada con otras de material radiotransparente (plástico) de tal forma que la radiación directa emitida por el tubo, pueda atravesar la rejilla pasando por las láminas de plástico que producen una atenuación muy pequeña.

Según trayectorias oblicuas a la rejilla sufre atenuación en proporción importante al cruzar las láminas de plomo.

Las rejillas análogas a las descritas, llamadas fijas o estacionarias tienen el defecto que las sombras de las láminas de plomo se superponen a la imagen, pero la interferencia no es importante si se usan rejillas de láminas muy estrechas. La imagen de la rejilla se evita completamente mediante un artificio mecánico, que hace entrar a la rejilla en vibración rápida durante el disparo del tubo.

Las rejillas descritas tienen un sistema de láminas en disposición paralela, por lo cual en sus extremos se produce una mayor atenuación de la radiación primaria. Una forma muy utilizada de evitar este inconveniente es el uso de rejillas enfocadas. Donde las láminas tienen una adecuada inclinación de forma que sus direcciones convergen hacia un punto, que debe coincidir con el foco del tubo para que su acción sea correcta. Una distancia incorrecta o un descentrado de rejilla conducen a imágenes muy deficientes.

Un inconveniente común a todos los tipos de rejilla es que el tiempo de exposición debe aumentarse de dos a seis veces, dependiendo del sistema utilizado. Esto sucede por la absorción de una cierta fracción de la radiación primaria y conduce a un aumento importante de la dosis que recibe el paciente.

### **Blindaje dorsal del chasis**

Se consigue atenuar eficazmente la radiación retrodispersada por obstáculos situados detrás de la película (suelo o paredes) disponiendo en la

parte dorsal del chasis una lámina de plomo (en Radiodiagnóstico médico basta con un espesor de 0.5 mm). Algunos modelos comerciales de chasis llevan incorporada en origen este eficaz blindaje.

### **Método de la hendidura**

Consiste en emplear un haz de rayos X muy fino, más reducido que el volumen que se desea explorar. Se colima el haz mediante una hendidura practicada en una placa metálica antes de incidir sobre el paciente y después de atravesar a éste, antes de llegar a la película. Para producir la imagen, ambos colimadores describen un movimiento de barrido sincronizado obteniéndose una haz altamente colimado y prácticamente exento de radiación dispersa.

El principal inconveniente de este método radica en los tiempos de exposición relativamente altos que precisa y de las cargas excesivamente altas para el tubo a que da lugar, y una que las imágenes obtenidas son mejores, en cuanto a contraste, que las obtenidas por rejilla.

El método de la hendidura se usa en los ortopantomógrafos usados en radiología odontológica.

### **Consideraciones generales sobre la formación de imagen**

Una imagen radiológica deberá ofrecer un grado de perfección tal que el especialista pueda valorar sus detalles en especial los relacionados con anomalías patológicas. La imagen será tanto más perfecta cuanto más fielmente reproduzca la zona anatómica de interés: *en general se alcanza esta condición cuando la imagen de un punto sea otro punto, y cuando las características de un punto (absorción y reflexión a las distintas longitudes de onda) puedan mantenerse en la imagen.*

En Radiodiagnóstico, el haz primario de rayos X atraviesa una determinada zona anatómica, y su distribución en un plano perpendicular al eje de propagación determina la llamada imagen primaria, que no es observable directamente. Para obtener una imagen visible se debe recurrir a sistemas de conversión adecuados.

El haz de radiación que emerge del paciente contiene radiación primaria y una proporción importante de radiación difusa, componente que debe ser reducido a un nivel suficientemente bajo mediante un sistema adecuado, tal como la rejilla antidifusora.

### **La imagen primaria puede convertirse en visible mediante:**

- a.-** Pantalla radioscopica
- b.-** Película radiográfica
- c.-** Intensificador de imagen y monitor de televisión

## **Pantalla radioscópica**

Este sistema está formado por un vidrio plomado, recubierto por una capa fina de una sustancia fluorescente: *este material sobre el que inciden los rayos X, convierte una fracción de su energía en luz visible*. La sustancia luminiscente más usada es el sulfuro de cinc y cadmio, cuya emisión luminosa amarillo-verdosa coincide con la zona espectral a la que es más sensible el ojo humano.

En el examen de esta imagen de fluorescencia, existe la dificultad que el brillo de la pantalla es bajo, lo que implica que la observación se realiza en condiciones de visión escotópica, situación ligada a una mala perceptibilidad de detalles. Por otra parte, la radioscopia exige una adaptación del observador a visión nocturna, durante un tiempo adecuado.

La radioscopia tiene, además otro inconveniente importante y es las dosis elevadas que recibe el paciente e incluso el operador, por lo cual la vigente normativa ha restringido su uso a casos donde esta técnica sea completamente necesaria.

## **La película radiográfica**

Los rayos X tienen la propiedad de impresionar películas radiográficas de forma análoga a como lo hace la luz visible. Para realizar el registro radiográfico se hace incidir el haz de radiación tras atravesar la zona anatómica de interés (imagen primaria): *seguidamente tras procesar la placa se obtiene la radiografía o imagen física*.

La radiografía es un método más caro que la radioscopia, pero tiene ventajas importantes, como son la menor dosis que recibe el paciente, mejor calidad y el poder observar la imagen radiológica sin precisar seguir exponiendo al paciente al haz de radiación.

## **Estructura de la película radiográfica**

Se compone de una superficie sensible a la radiación (emulsión extendida en una o ambas caras de una película plástica (poliester) llamada soporte. La perfecta adherencia entre las capas de emulsión y el soporte se alcanza mediante un tratamiento químico de este último, que forma una capa intermedia llamada substrato.

## **Magnitudes que definen la calidad de la imagen radiográfica**

En Radiodiagnóstico, la calidad de las imágenes radiográficas se estima a partir de criterios de visualización de detalles anatómicos en dichas imágenes.

Para que la radiografía ofrezca al radiólogo una capacidad óptima de diagnóstico, la imagen registrada debe reproducir el detalle de la zona explorada del paciente de forma clara y diferenciada. Se afirmará entonces que la radiografía tiene una buena definición.

Cuando se observa una radiografía en un negatoscopio se aprecia que existen zonas locales que presentan distintos niveles de gris que van desde el blanco al negro. Si se dirige un haz luminoso a una zona determinada, se observa que a una intensidad de luz incidente  $Y$  se corresponde a una intensidad de luz transmitida  $I_t$ . Se define entonces la densidad  $D$  como:

$$D = \log I/I_t$$

Una radiografía que tenga una buena definición debe poseer los siguientes atributos:

- 1.- Las variaciones de densidad existentes deben ser apreciables al observar la placa radiográfica en un negatoscopio
- 2.- Los bordes que separan zonas de distinta densidad deben estar bien definidos.

Estas propiedades se valoran con el contraste y la nitidez de la imagen respectivamente.

Los factores que afectan al contraste radiográfico son:

#### **Contraste del paciente**

Está influido, sobre todo por el kilovoltaje y la radiación dispersa, disminuyendo a medida que aumenta el kilovoltaje.

#### **Materiales fotográficos**

El contraste propio de una película es una consideración primordial, junto con las condiciones en que fue procesada y la utilización o no, de pantallas de refuerzo.

#### **Condiciones de visibilidad para el examen en el negatoscopio**

Intensidad, color y uniformidad de la iluminación y uso de máscaras (limitadores de subzonas de observación para apreciar mejor detalles en zonas de alta densidad).

#### **Moteado cuántico**

Cuando sobre el suelo seco comienza a llover y las primeras gotas dejan su huella en el suelo, hay una heterogeneidad de elementos de superficie, secos y mojados. Al seguir lloviendo llega un momento que el suelo está homogéneamente mojado. Esta imagen se parece mucho al llamado ruido cuántico. Cuando un sistema radiográfico recibe una dosis de fotones de rayos X, y mediante un convertidor (pantalla reforzadora o intensificador de imagen) aquellos se transforman en una mayor cantidad de fotones de luz visible que



conforman la imagen visible final, esta puede tener un aspecto granuloso; a este fenómeno se le denomina ruido cuántico.

**Los factores que afectan a la nitidez de la imagen radiográfica con:**

**Geometría del equipo/disposición de la película/sujeto**

El tamaño del punto focal y las distancias relativas entre el punto focal, el sujeto y la película son las variables más importantes.

**Movimientos del paciente**

La magnitud de la penumbra cinética producida depende de la rapidez y de la duración del movimiento del paciente, y también de la duración de la exposición.

**Factores fotográficos**

La buena definición de la imagen está influida por las características propias de las películas y de las pantallas.

**Halo (reflejo de la luz en el interior de la película) y moteado cuántico**

**Las cartulinas de refuerzo**

En la fotografía convencional, la luz visible que incide en la emulsión fotográfica es absorbida con alta probabilidad por lo cual niveles luminosos muy débiles pueden impresionar la placa.

En cambio, en la radiografía se presenta una diferencia importante y es el gran poder de penetración de los rayos X ya que en promedio, tan solo el 1% de los fotones incidentes producen impresión en la emulsión. Esta situación requiere, en principio, tiempos de exposición largos, o intensidades de corriente del tubo elevadas, con el resultado de un incremento indeseable de la dosis que recibe el paciente.

El defecto descrito se evita parcialmente mediante la utilización en radiografía de película con dos capas de emulsión; pero, en muchas situaciones la ganancia de sensibilidad no resulta completamente adecuada. Tal ocurre por ejemplo al tratar de evitar la penumbra cinética se deben emplear tiempos de exposición muy cortos, combinados con intensidades muy elevadas, que llevan al tubo a la zona de destrucción en las curvas de carga, o al bloqueo del disparo en tubos modernos.

Una solución muy aceptada del problema propuesto la constituyen las cartulinas o pantallas de refuerzo, cuya estructura se representa esquemáticamente en la figura adjunta.

Una pantalla actual utilizada en Radiodiagnóstico Médico está formada por una capa delgada de microcristales de una sustancia fluorescente, capaz de convertir una fracción de la energía depositada por los rayos X en luz visible. La capa fluorescente, se encuentra depositada

sobre una capa reflectora y ésta sobre un soporte semiflexible de plástico o cartulina. La capa fluorescente se encuentra protegida por una capa superior transparente, impermeable y capaz de resistir adecuadamente la abrasión superficial.

Las pantallas de refuerzo se montan en chasis especiales en los que se dispone de película de contacto íntimo con una o dos pantallas en la capa transparente dispuesta sobre la emulsión. En estas condiciones, el efecto directo de sensibilización causado por los rayos X en la emulsión se unen los efectos de la luz visible de fluorescencia emitido en los puntos de cruce de la radiación en las pantallas.

La ventaja principal de las pantallas intensificadoras se debe a que en una exposición radiográfica, el 5% de la sensibilización se debe a la acción directa de los rayos X mientras que el 95% restante procede de la fluorescencia de la pantalla. Por ello, la utilización de las pantallas de refuerzo reduce la intensidad de radiación necesaria para obtener la radiografía, con la consiguiente disminución de la dosis recibida por el paciente, y la prolongación de la vida útil del tubo. Posibilita igualmente la utilización de tiempos de exposición mucho más cortos, de gran importancia en campos como la Radiología Pediátrica.

Sin embargo, no todo son ventajas en este proceso, porque las pantallas intensificadoras ofrecen una desventaja genérica, de que la luz de fluorescencia en cada punto de la pantalla se emite en un cono de difusión, por lo cual la nitidez de la imagen se ve afectada en mayor o menor grado.

Las pantallas intensificadoras se clasifican en normales, donde el medio fluorescente es wolframato cálcico y las de tierras raras, cuyo rendimiento de conversión luminiscente es una 5 veces más elevado.

## **El intensificador de imagen**

La radioscopia con visión directa en pantallas convencionales plantea el inconveniente de la escasa luminosidad de la imagen, lo que obliga que la sala esté a oscuras y por ello el operador debe adaptar su visión durante 10-15 minutos, existiendo el riesgo de paliar dicha deficiencia con un aumento de la intensidad de radiación, produciendo, consecuentemente, un aumento de dosis al operador y al paciente.

El fundamento de los sistemas de radioscopia con intensificador de imagen consiste en una conversión de la imagen primaria en otra de mayor brillo mediante electrones como agentes intermedios.

Mediante este procedimiento la luz producida en la pantalla por los rayos X se hace incidir en la otra pantalla que es fotosensible, es decir, libera electrones al recibir la luz. Estos electrones son acelerados mediante

una adecuada diferencia de potencial, con lo cual el haz electrónico incide en la pantalla 3 produciendo una imagen cuyo brillo es miles de veces mayor que la de la imagen de entrada. A la salida se puede acoplar una cámara de televisión, pudiendo observarse la imagen por el radiólogo, protegido por un blindaje estructural.

NO COPIAR

# FUNDAMENTOS DE LA DETECCIÓN DE RADIACIONES

## Principios físicos

La base de la detección de radiación ionizante, es un mecanismo de interacción con la materia y producción de electrones rápidos (en el caso de electrones mediante colisiones elásticas y en el de fotones como consecuencia de interacciones fotoeléctricas y Compton) en el resultado final que una fracción de energía de la partícula o fotón incidente se transfiere al medio detector.

Las partículas cargadas, tales como los electrones, producen ionización en el absorbente, debida a la interacción electrostática de su carga con los electrones del medio, por lo cual se dice que son directamente ionizantes.

En cambio, las partículas carentes de carga eléctrica como los fotones recorren la materia hasta experimentar una colisión con alguno de los electrones del medio, y en este caso son los electrones rápidos liberados por efecto fotoeléctrico o Compton los que producen mayoritariamente la ionización, por lo cual se dice que estas partículas producen ionización indirecta.

## Dosimetría de la radiación

Los daños biológicos causados por la radiación ionizante vienen determinados por la energía cedida por las partículas a los tejidos en las que interactúan. La dosimetría es una rama de la radiología que trata de la medida de la energía absorbida, operación que se realiza con unos detectores especialmente calibrados y que se llaman genéricamente dosímetros.

### Dosimetría ambiental o de área

Es la dosimetría practicada en la determinación de dosis en zonas de instalaciones o, en general, en ambientes en los que se requiere evaluar el riesgo radiológico

### Dosimetría personal

Es la dosimetría practicada en la determinación de dosis a personas que, por razón de su actividad profesional, por residir en zonas de riesgo o por recibir radiaciones como consecuencia de un tratamiento médico, son controladas mediante dosímetros.

## **DETECTORES UTILIZADOS EN INSTALACIONES DE RADIODIAGNÓSTICO**

### **Cámara de ionización**

Las magnitudes de interés en dosimetría (exposición, dosis, energía) pueden medirse a partir de la conductividad de una masa gaseosa contenida en un recinto adecuado y en el que se encuentran dos electrodos debidamente polarizados. En ausencia de radiación un gas se comporta como aislante, por cuya razón no circula corriente alguna entre ambos electrodos.

Sin embargo, cuando el espacio interelectródico es cruzado por radiación ionizante, la formación de iones y electrones y su posterior captación (los iones por el electrodo negativo y los electrones por el positivo), produce una corriente eléctrica medible (el gas se vuelve parcialmente conductor). A este dispositivo detector se le conoce con el nombre de cámara de ionización.

### **Curva característica**

Si un haz de fotones de intensidad constante interacciona con el gas de la cámara la corriente medida por un electrómetro en función de la tensión aplicada crece con dicha tensión hasta un valor de saturación.

La intensidad de corriente medida en la cámara de ionización depende de la tensión de polarización. Para tensiones bajas el campo eléctrico en la cámara es débil y muchos de los iones, después de formados, se recombinan de nuevo, por lo que se medirá una corriente de valor reducido.

A medida que aumenta la diferencia de potencial una proporción creciente de iones y electrones es captada por los respectivos electrodos, aumentando por tanto la corriente que atraviesa la cámara. Cuando el campo eléctrico es suficiente para que la recombinación prácticamente no se produzca, se alcanza la corriente de saturación, que permanece constante aunque aumente la tensión dentro de ciertos límites. A igualdad de todas las demás condiciones, dicha corriente de saturación es proporcional a la intensidad de radiación que incide sobre el volumen eficaz de la cámara.

Las intensidades de corriente en una cámara de ionización son del orden de  $10^{-14}$  amperios, que son demasiado débiles para su medida directa, por lo cual deberán ser convenientemente magnificadas mediante amplificadores de corriente, de alta ganancia, y buena estabilidad y reproductibilidad.

### **Dosimetría personal basada en la ionización gaseosa**

Los dosímetros (medidores de dosis) o exposímetros (medidores de exposición), se agrupan en dos tipos de distintos instrumentos llamados ambientales si se destinan a evaluar niveles de radiación en posiciones fijas en la instalación, o personales dedicados a la vigilancia radiológica individual de cada uno de los trabajadores.

### **Dosímetros personales: dosímetros de pluma**

Para control individual se utilizan los llamados dosímetros de pluma que permiten la lectura directa de la exposición o de la dosis (típicamente hasta 200 mR o hasta 5 R).

Su funcionamiento se basa en utilizar como detector un condensador formado por dos electrodos soportados por un material aislante de alta calidad. El dosímetro se carga al aplicarle una cierta diferencia de potencial (típicamente alrededor de 200 V) a sus electrodos, tensión que permanece en tanto no sea ionizado el gas que hay entre ellas. Los rayos X son capaces de producir esta ionización, generando cargas libres de uno y otro signo que neutralizarán a las que mantienen la diferencia de potencial.

Por tanto, la diferencia de potencial entre ambos electrodos va disminuyendo a medida que llega radiación al dosímetro, pudiendo establecer una correspondencia entre aquella y la exposición producida por el haz de rayos X (máxima diferencia de potencial equivalente a una exposición nula).

Este dosímetro lleva incorporado un dispositivo de lectura directa (aguja indicadora de un electrómetro que se mueve sobre una escala graduada en R o mR) de manera que se puede conocer el valor acumulado, observando por transparencia la escala de lectura a través de un adecuado sistema óptico.

Estos dosímetros se utilizan cuando el tipo de trabajo a realizar con radiaciones hace prever exposiciones intensas en tiempos cortos, tales como una jornada laboral. Más allá de este plazo, las indicaciones del dosímetro pueden estar sesgadas por exceso, ya que el condensador tiende a descargarse espontáneamente con el tiempo, aún en ausencia de radiación. Por eso, su utilización queda restringida a una jornada de trabajo, debiendo leerse al final de su uso y recargarlo para una nueva utilización.

### **Monitores de radiación**

Los exposímetros (o dosímetros) ambientales pueden dividirse en fijos o portátiles. Los fijos son poco empleados en instalaciones de radiodiagnóstico. Los ambientales de tipo portátil llamados comúnmente monitores de radiación son instrumentos alimentados con pilas o acumuladores.

Los equipos de uso habitual suelen estar posibilitados para medir exposición a dosis así como sus respectivas tasas, ambos modos seleccionables con su conmutador. Otro mando permite variar la sensibilidad de la escala del medidor, de forma que sus indicaciones a lo largo del margen de utilización (unas cinco décadas, típicamente) pueden leerse con suficiente precisión.

En muchas ocasiones los monitores de radiación van provistos de un absorbente abatible sobre la zona de incidencia de la radiación sobre el detector. Por su espesor y composición. Dicho absorbente produce una atenuación de la radiación X equivalente a la que dicha radiación experimentaría en la piel. Por consiguiente, las medidas hechas con el detector desnudo suministran valores de dosis y exposición a nivel de la piel, mientras que las realizadas con el absorbente abatido representan los valores que se encontrarían en profundidad, de dichas magnitudes.

La fiabilidad de lectura de los monitores de radiación se basa en tres comprobaciones que deben realizarse al comenzar la utilización del instrumento. Tales operaciones son:

### **Estado de capacidad de las baterías**

Los monitores de radiación permiten la comprobación del correcto estado de la batería, en una de las posiciones del conmutador de sensibilidad de escala. En dicha posición, la indicación del instrumento se sitúa en una zona marcada especialmente para la prueba, si la carga de la batería es suficiente. Caso contrario es mandatorio el cambio de pilas, pues las lecturas pueden ser in fiables.

### **Ajuste de cero**

Otra comprobación del monitor es el ajuste del cero electrónico (en ausencia de radiación y con el aparato encendido no debe haber indicación en ninguna escala) que se realiza colocando el conmutador correspondiente en la posición de ajuste de cero.

### **Finalmente puede ajustarse el cero mecánico del microamperímetro**

(debe indicar cero en el aparato apagado) accionando sobre un tornillo de ajuste en el eje del cuadro del mismo.

### **Comprobación de lectura**

Para verificar la fiabilidad de lectura, el equipo se suministra con una fuente de referencia beta o gamma, que debe producir una indicación determinada al situar la muestra en contacto con el detector.

## Dosímetros de termoluminiscencia

Ciertos sólidos cristalinos tienen la propiedad que al recibir radiación ionizante, algunos de sus electrones son excitados y permanecen en tal estado, hasta que la sustancia se calienta a 250°C, lo que permite a los electrones excitados volver a sus niveles estables, emitiéndose la diferencia de energía en forma de luz. Este fenómeno se llama termoluminiscencia y es de gran interés en el campo de la dosimetría personal, pues en condiciones adecuadas la luz emitida es proporcional a la dosis absorbida.

El dosímetro termoluminiscente adopta la forma de un pequeño cristal de naturaleza adecuada montado en un soporte provisto de una pinza, mediante la cual se puede sujetar el dispositivo a la ropa de trabajo. Los dosímetros se leen en condiciones normales tras un mes de trabajo.

El dispositivo de lectura consiste en un microhorno que realiza el ciclado térmico del cristal, más un fotomultiplicador y la cadena electrónica asociada. El horno eleva la temperatura del cristal hasta un cierto valor, del orden de los 250°C o inferior, y la luminiscencia generada es transformada en señal eléctrica e integrada por el fotomultiplicador y los dispositivos electrónicos.

El microprocesador incorporado al sistema, calcula entonces la dosis acumulada y la indica al operador mediante un sistema de lectura, variable según el tipo de dispositivo.

Las ventajas más importantes que presentan los dosímetros de termoluminiscencia son:

- a.-** Cuando se utilizan cristales de naturaleza adecuada como el FLi, el valor de la dosis medida coincide muy aproximadamente con la que recibiría en el mismo punto un tejido biológico blando, pues en ambos casos es muy semejante al número atómico efectivo.
- b.-** Una vez se ha leído un dosímetro de termoluminiscencia, una elevación posterior de temperatura lo pone a cero, lo que permite su reutilización indefinida.
- c.-** La respuesta de los dosímetros TL resulta lineal en intervalos de dosis extensísimos, típicamente desde 100  $\mu$ Gy hasta 1000Gy, lo que les convierte en dispositivos utilizables en grandes márgenes de variabilidad de condiciones.

Entre los inconvenientes que presentan destacan que estos dosímetros no pueden archivar para formar un historial dosimétrico, pues son borrados en el proceso de lectura. Además, los de buenas características pueden resultar relativamente caros. Finalmente, requieren procedimientos



de calibración y ciclado térmico cuidadoso (particularmente, en este último debe practicarse de acuerdo con una curva de variación temperatura/tiempo, que sea suficientemente reproducible, para que sean comparables los resultados de distintas medidas). Ello hace que la instrumentación de precisión resulte costosa.

Los dosímetros de termoluminiscencia más frecuentes usados son los de  $\text{Fli}$  y  $\text{SOP}_4\text{Ca}$ , con distintas sustancias activadoras y distintos estados de agregación (en forma de cristales, embutidos en soportes de teflón, etc.).

### **Emulsión fotográfica**

Las emulsiones fotográficas no sólo son sensibles a la luz, sino también a los fotones X o gamma, radiación que produce en la emulsión una imagen latente que una vez revelada y fijada produce una imagen consistente en un ennegrecimiento cuya intensidad es proporcional a la dosis.

### **Lectura de dosímetros fotográficos**

Tras exponer la película a la radiación tras el revelado y fijado, su lectura se realiza por procedimientos microdensitométricos. La microdensitometría supone estudiar la transmisión de un haz luminoso a través de la película, con auxilio de una escala fotoeléctrica, estableciéndose la dosis recibida a partir de una curva de calibración.

### **Ventajas y desventajas de los dosímetros fotográficos:**

#### **Ventajas:**

**a.-** La película dosimétrica introducida en un sobre de papel negro, va montada en un soporte sobre el cual existen una serie de ventanas provistas de filtros adecuados que permiten realizar la dosimetría en campos mistos de radiación (beta, X, gamma, neutrones, etc.). Esta ventaja no resulta importante en el campo del radiodiagnóstico.

**b.-** Las películas dosimétricas debidamente reveladas y fijadas constituyen un soporte permanente de información y pueden archivar para formar parte del historial dosimétrico del trabajador.

#### **Desventajas**

En contrapartida, la película fotográfica presenta algunas desventajas importantes. Así este dosímetro adolece de mayor imprecisión en la medida de dosis elevadas, incluso utilizando película de doble emulsión. Por otra parte, las secuencias de revelado y medida deben realizarse siguiendo pautas minuciosas, porque cualquier variación conduce a sesgos importantes en los resultados.

En el manejo de dosímetros fotográficos deben tenerse en cuenta ciertas precauciones. Por ejemplo, las placas fotográficas presentan un proceso en envejecimiento con el tiempo de almacenamiento, que sesga por exceso los valores de dosis registrados. Si la película experimenta los efectos de temperaturas elevadas o la acción de ciertos vapores, pueden sufrir sensibilización espúrea, que conduce a ennegrecimiento incontrolado en el revelado, y consecuentemente error por exceso en las medidas.

### **Instrumentos de detección para dosimetría al paciente**

En general, la dosimetría de un paciente sometido a radiación X puede realizarse de dos formas distintas:

#### **Dosímetros de termoluminiscencia**

Los dosímetros más utilizados en dosimetría al paciente son los de termoluminiscencia, que se colocan sobre la piel del paciente. Para ciertas exploraciones se realiza una simulación con un maniquí antropomorfológico, realizándose las medidas dosimétricas con una cámara de transmisión o, simplemente con una cámara de ionización para medidas en haz directo.

#### **La cámara de transmisión**

Una cámara de transmisión es un dispositivo que colocado en el cabezal del tubo de rayos X, permite efectuar lecturas del producto (dosis) x (área), y consiste en un detector de ionización gaseosa (cámara de ionización cuyo gas es aire seco), con paredes equivalentes a aire y calibrado para que sus lecturas se expresen en Gy x cm<sup>2</sup>

#### **Ventajas e inconvenientes de los sistemas de dosimetría**

El dosímetro con más ventajas es la cámara de transmisión. El procedimiento menos invasivo, que menos repercute en la exploración y no existe contacto físico entre el paciente y el dosímetro.

En segundo lugar se utiliza el dosímetro de termoluminiscencia que, además de resultar muy cómodo, resulta invisible en la exploración, es decir, en la radiografía no aparece ninguna imagen dejada por el dosímetro.

# CONTROL DE CALIDAD EN INSTALACIONES DE RADIODIAGNÓSTICO, MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN DE DETECTORES

## Introducción

Se define el control de calidad como el conjunto de procesos mediante los que se verifican si una serie de parámetros característicos del funcionamiento de los equipos (kilovoltaje, miliamperaje, tiempo de exposición, etc.) se mantienen dentro de su margen de tolerancia que se considera razonable para su correcto funcionamiento.

El control de calidad en la cadena de imagen resulta de gran importancia para disminuir las dosis recibidas por el personal de la instalación y los propios pacientes. No conviene olvidar que los desajustes en la cadena de imagen repercuten desfavorablemente de dos formas distintas: *ocasiona mala perceptibilidad de los detalles de la imagen y aumentan el nivel de dosis. La circunstancia desfavorable que supone la repetición de un estudio dobla la dosis recibida.*

## Determinación de la calidad del espectro

La calidad del espectro, o sea su distribución o forma de función de la energía, es muy difícil realizar debido a los flujos elevados de fotones que se observan en el haz primario, por lo cual en Radiodiagnóstico se prefiere expresar la calidad en función del kVp, la capa hemirreductora y el coeficiente de heterogeneidad.

## Determinación del kilovoltaje pico

El kilovoltaje pico es un parámetro crítico en la realización de radiografías: su valor se toma de las tablas o gráficas existentes en el Servicio, en función de la zona anatómica o complejidad del paciente. Las posibles diferencias entre los valores del kVp nominal (valor del selector de consola) y efectivo (valor real) produce variaciones en el contraste y en la densidad de la radiografía, generalmente indeseables, pues disminuyen la perceptibilidad de detalles y también pueden suponer aumentos innecesarios de dosis al paciente e incluso al personal de operación.

La comprobación del kilovoltaje pico puede realizarse en un kilovoltímetro digital, basado en la operación de dos diodos de silicio. Estos instrumentos que dan una presentación digital del resultado de la medida, sirven únicamente para tubos con determinado material anódico.

Si la diferencia entre los valores nominales y efectivos supera un 10%, se debe solicitar del servicio técnico para que proceda a reajusta la tensión de operación.

### **Linealidad de la exposición con el miliamperaje y el tiempo de disparo**

Una comprobación del correcto funcionamiento del cronorruptor, es realizar una serie de disparos a kVp constante, para la serie de tiempos de disparo de duración variable y midiendo en cada caso la exposición medida en el haz directo con una cámara plana especial. Si se observan desviaciones mayores a un 10%, hay que proceder al ajuste del cronorruptor.

Otra comprobación paralela a la anterior descrita, es medir la exposición en haz directo variando el miliamperaje, manteniendo fijos tanto el kilovoltaje como la duración del disparo. De nuevo, la existencia de desviaciones mayores del 10% implican necesariamente la intervención del servicio técnico.

Finalmente debe comprobarse, que manteniendo constante el producto del miliamperaje por el tiempo de disparo (mAs) se obtienen lecturas de exposición o dosis constantes. Esta operación constituye la prueba de reciprocidad, en la cual una variación mayor de un 20% indica la existencia de una disfunción en el equipo.

### **Fotoexpositómetro automático y dispositivos asociados de seguridad**

El fotoexpositómetro automático es un dispositivo que ajusta automáticamente el tiempo de disparo para alcanzar condiciones óptimas de contraste en la radiografía.

El expositómetro automático consta usualmente de tres sensores, que son cámaras de ionización o detectores fotosensibles, de los que se selecciona uno, normalmente,. El más próximo al campo que con mejor detalle se desea radiografiar.

Las cámaras van situadas entre el paciente (zona de salida del haz) y la película, y se calibra el sistema para que se interrumpa la generación de rayos X cuando la película ha recibido radiación suficiente para formar la imagen correcta. Como la cantidad de radiación necesaria es función de la combinación pantalla-película, el fotoexpositómetro automático sólo es válido para el sistema de imagen previsto debiendo ser modificado si se cambia la velocidad en el soporte de la imagen.

El control de funcionamiento se verifica con un maniquí homogéneo de material equivalente al del paciente, y realizando tres radiografías a

sendos valores del kilovoltaje (ejemplo 60, 80 y 100 kV) comparando en las placas procesadas las lecturas de la densidad. Este ensayo conviene repetirlo dos veces, una según la normativa descrita y otra, interponiendo un absorbente de plástico, de 8-10 cm de espesor.

### **Colimación del haz**

Es muy importante la comprobación de la coincidencia del haz de rayos X, con el haz luminoso que proyecta el sistema, para centrar y limitar la zona de irradiación.

La falta de coincidencia entre ambos campos produce efectos muy desfavorables. Si el haz de radiación es mayor que la zona iluminada, se estará irradiando zonas u órganos del paciente no deseados, con los inconvenientes ya citados de aumento de la radiación difusa y dosis al paciente; si el haz de radiación es menor, no aparecerá en la imagen la totalidad de la información prevista y habrá de repetirse el estudio, duplicándose así la dosis que recibiría el paciente.

Un método simple para evaluar la coincidencia del haz de radiación con el de localización, es colocar un chasis de 24x30 en la mesa de exploración y colimar manualmente el haz hasta alcanzar un rectángulo iluminado de unos 15x20 cm. A continuación se colocan dos monedas en cada uno de los lados, de forma que sean tangentes a la línea de delimitación del haz, una dentro u otra fuera del rectángulo.

En estas condiciones se realiza el disparo y se procesa la placa comprobando entonces la coincidencia de haces. Si la diferencia de dimensiones de ambos rectángulos supera 1 cm en cualquiera de los lados, se requiere la intervención del Servicio Técnico.

### **La filtración del haz primario**

La medida de la filtración del haz puede realizarse mediante métodos indirectos basados en la determinación de la atenuación que experimenta el haz de rayos X trabajando a una tensión fija a la que se haya calibrado el equipo de medida.

De no disponer de los citados equipos, especialmente diseñados para control de calidad de generadores y tubos de rayos X, la medida puede hacerse con media docena de disparos, interponiendo espesores variables de Al, por ejemplo entre 0 y 5 mm.

Representando en papel semilogarítmico el efecto producido por la radiación a la salida del tubo (mGy, mR o cualquier otra unidad) frente al espesor del Al, puede conocerse la capa hemirreductora observando sobre la

gráfica la distancia en mm que separa un punto de otro con ordenada mitad, cuidando que esta observación se haga en un tramo rectilíneo.

La filtración se conoce a partir de ese valor, mediante tablas adecuadas que relacionan ambos parámetros para unos datos concretos de generador (tipo de rectificación) y tensión de trabajo a la que la capa hemirreductora ha sido medida.

### **Control de la película radiográfica y del sistema de visualización de imagen**

En el control de la cámara oscura, debe verificarse la carencia de entrada indebida de luz que pueda provocar velo en el proceso de manipulación de las películas. En control realizados en instalaciones de grandes hospitales se ha visto que un 80% de las cámaras oscuras presentan fallo por fugas a través de los cercos de la puerta de acceso, o por filtros inadecuados en la instalación de alumbrado de la cámara, por tener excesiva intensidad de luz de seguridad, no siendo raro encontrar simultáneamente presentes más de una de estas causas.

Es importante tener en cuenta que no todas las películas pueden manejarse con la misma luz de seguridad. Por su parte, los filtros de la luz de seguridad no tiene vida limitada, conviene sustituirlos con una periodicidad anual, al menos.

Con periodicidad semestral, debe exponerse una película (de máxima velocidad que sea previsible utilizar) en esa cámara revelándola posteriormente y midiendo el velo con auxilio del densitómetro. Este no debe rebasar en ningún caso el valor límite de 0.25.

Por otra parte, en caso de cambio a una película más sensible que la utilizada hasta el momento, puede convenir reducir la potencia de las luces de seguridad (o sustituir los filtros) de los cuartos oscuros.

### **Los negatoscopios**

Deben limpiarse de modo regular, tanto los tubos fluorescentes como las superficies difusoras de los negatoscopios. Mediante un fotómetro, se comprobará que el brillo de las pantallas es uniforme y está dentro de los límites recomendados, sustituyendo de ser necesario los tubos. Finalmente, con el fotómetro debe estudiarse si el balance de luces ambiental/negatoscopio permite una cómoda visión.

### **Chasis-pantallas de refuerzo-películas**

Las hojas de refuerzo deberán limpiarse periódicamente, según las instrucciones de fabricante. Una buena forma de saber si precisan limpieza y de conocer su estado de uso es el iluminarlas con una luz ultravioleta y observarlas en la cámara oscura.

Debe controlarse el contacto pantalla-película en toda la superficie, mediante una malla adecuada (con reticulado de 3 mm), que se colocará en contacto con el chasis, se realizará un disparo con el tubo, procurando alcanzar en la placa una densidad de 1.5. La observación de un mal contacto se caracteriza por una zona en la que la malla se observa con menos nitidez (más borrosa).

Finalmente, debe comprobarse, mediante pruebas adecuadas, que el chasis es suficientemente estanco a la luz ambiental.

### **La calidad de la imagen**

Mediante este control se intenta conocer la resolución espacial, dato que será diferente en función del tamaño del foco efectivo, por lo cual es conveniente determinar las características del foco antes de medir la resolución.

Existen dos dispositivos especializados para esta comprobación. Uno es un conjunto de mallas metalizadas de diferente reticulado, que ocupan sectores circulares del útil. El otro, para estimar las dimensiones del foco, puede ser un conjunto de tríos de marcas, o bien una serie de barras colocadas en una distribución radial. Las medidas se hacen colocando cada objeto sobre una película dentro de su chasis y realizando sendas exposiciones.

### **Control de intensificadores y monitores de televisión**

Genéricamente el control de intensificadores de imagen se realiza midiendo la dosis a la entrada del intensificador. Tal operación presenta en ocasiones muchas dificultades, y se sustituye por la mitad de la dosis a la entrada del paciente, y estimado en función de este resultado la dosis a la entrada del intensificador.

No es inusual que existan diferencias en los intensificadores de imagen, en equipos antiguos ligados a dosis altas y en equipos modernos debidos a problemas de distorsión de imagen (distorsión en corsé o barrilete por aberraciones en las lentes electrónicas). Las distorsiones en caso de existir suelen ser aparatosas.

Los controles de distorsión y disolución se hacen por medio de una malla de hilos cruzados horizontales y verticales, en cuya imagen se trata de

observar distorsiones (curvatura en la imagen de los hilos) o resolución, (agujeros o hilos en la malla).

## **Control del procesado de películas**

Es un hecho conocido en la práctica radiológica que en un gran número de casos de radiografías de mala calidad, la causa de los defectos está ligada con disfunciones en el procesado de las películas. Por esta razón, el control de calidad del procesado debe recibir atención preferente.

El control de procesado varía según sea manual o automático y en ambos casos existen diferencias según la procedencia comercial de los equipos utilizados, por lo que en cada situación específica, el usuario debe seguir las pautas fijadas por el fabricante.

Sin embargo, deben conocerse dos parámetros simples cuyo control es eficaz: *pH* y *temperatura*.

El primero es el indicador más simple del estado de los reactivos. Debe controlarse semanalmente, como mínimo, usando un medidor de pH, que tanto el revelador (pH de 8 a 13) como el fijador (pH entre 3 a 6) están en buenas condiciones.

Por otra parte la temperatura del baño revelador no debe superar un intervalo de variación de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  respecto a los valores especificados en los protocolos de operación.

## **Análisis de calidad de imágenes**

Se deben evaluar periódicamente (al menos una vez al año) la calidad de las imágenes de cada sala, lo cual permitirá detectar disfunciones en la cadena de la imagen o en el generador, casi siempre asociadas a dosis al paciente elevadas.

El análisis de exploraciones repetidas es uno de los puntos clave de los programas de control de calidad. Deben buscarse procedimientos sencillos para detectar y registrar las causas de las posibles repeticiones de disparos y/o de exploraciones completas (en este caso la causa podrá ser externa al servicio de Radiodiagnóstico: indicación previa errónea, falta de transmisión de la información de exploraciones ya realizadas, etc).

La evaluación periódica del número de radiografías repetidas y desechadas y el análisis de las causas que lo motivaron permitirá detectar fallos, tanto en el equipo de rayos X y dispositivos asociados, como en los protocolos de la exploración y en la formación y entrenamiento del personal.



## **Calibración, verificación y condiciones de utilización de los distintos tipos de detectores**

Los monitores ambientales y los dosímetros son herramientas de importancia en un programa de control de calidad de una instalación de Radiodiagnóstico. Son necesarios para determinar la capa hemirreductora y para medir tasas de exposición de radiación directa y dispersa. Además, pueden servir para la medida de la atenuación producida por rejillas u objetos en el haz.

### **Pueden considerarse tres tipos de instrumentos:**

- Monitores ambientales, de bajo nivel
- Dosímetros de pluma
- Dosímetros de uso general de cámara de ionización

En mamografía interesará, en general, disponer de cámaras con ventana de entrada delgada.

Todas las cámaras presentan dos dependencias: con la energía y la tasa de los fotones, por lo que su uso sin tener en cuenta estas características supone obtener resultados sin significación física o confusos de interpretar.

Los dosímetros para diagnóstico pueden resultar eficaces, con una precisión en torno al 5% entre 30 y 120 keV. La dependencia con la tasa es importante por las altas intensidades que se utilizan en diagnóstico y que repercuten en lecturas inferiores a las reales.

La observación de la constancia de condiciones de operación, niveles de exposición, etc. o sus posibles variaciones, se realiza a partir de detectores de radiación diversos, cuyo buen funcionamiento será, por tanto, la clave para conocer el comportamiento de la instalación, dentro o fuera de los límites previstos.

Por tanto es necesario comprobar periódicamente su correcta operación. La forma de realizarlo es contrastar sus lecturas empleando fuentes de radiación de respuesta muy bien conocida y ajustar la electrónica de forma que la indicación del instrumento sea lo más próxima posible al valor de referencia. El procedimiento total de ajuste es la calibración y habrá de hacerse en laboratorios debidamente autorizados por el Consejo de Seguridad Nuclear.

La periodicidad de calibración en equipos ambientales para medir radiación directa o dispersa es variable, siendo imprescindible disponer del correspondiente certificado de calibración actualizado, para que sus lecturas se consideren fiables.

La calibración debe realizarse además, después de cualquier reparación o sustitución de componentes.

NO COPIAR

## **RADIOBIOLOGÍA**

Es la ciencia que estudia los fenómenos que suceden cuando un tejido vivo ha absorbido la energía cedida por las radiaciones ionizantes.

Se podría definir como el estudio de los fenómenos que se suceden en un tejido vivo que ha absorbido la energía depositada por las radiaciones ionizantes. Lesiones que se producen y mecanismos que tiene el organismo para compensar estas lesiones.

Como la interacción de la radiación en un átomo es probabilística, la posible lesión que produzca tendrá también carácter probabilístico y aunque el depósito de energía es un proceso físico que ocurre en un tiempo muy corto (del orden de  $10^{-17}$  s), el posible efecto biológico puede aparecer después de un periodo de latencia que puede ser hasta de años.

Por el carácter probabilístico de la interacción, ésta no se realiza de forma selectiva sobre ninguna zona concreta de la célula. La lesión que producen las radiaciones ionizantes no es específica de la misma, idénticas lesiones se pueden producir por otras causas; de ahí la dificultad de discernir los efectos causados por las radiaciones ionizantes frente a otras causas.

La acción de las radiaciones ionizantes sobre la célula siempre es de tipo lesivo, siempre se produce un daño a la célula y nunca un beneficio. En determinadas circunstancias se busca dañar cierto tipo de células, como es el caso de la radioterapia antitumoral que persigue la destrucción de las células de los tumores malignos, por su mayor radiosensibilidad frente a las células sanas.

### **INTRODUCCION HISTORICA.**

En 1.896 Henri Becquerel descubrió las propiedades perjudiciales de la radiactividad, tomando en cuenta las quemaduras que le produjo un frasco que contenía  $Ra_{226}$ . Ese mismo año Clarence Madison Dally, se sometió a radiaciones que acabaron con su vida, era ayudante de Thomas Alva Edison, inventor del fluoroscopio.

Durante la exposición industrial realizada en 1.896 en Nueva York, Dally expuso, reiteradamente, sus manos al experimento presentado por él, consistente en un equipo de rayos X, cuyo objetivo era observar las sombras en el esqueleto humano.

Poco tiempo después las manos se le ulceraron, siéndole posteriormente amputadas. El cáncer contraído le fue progresando en su

organismo y en 1.904 acabó con su vida. *Fue la primer victima descrita por las radiaciones ionizantes.*

En 1927 Muller descubrió en la *Drosophila* mutaciones inducidas por las radiaciones X. Dos años más tarde Goldstein asociaría la alteración del desarrollo con la exposición a radiaciones ionizantes.

Desde entonces se ha realizado numeroso estudios sobre las radiaciones ionizantes y sus efectos en el material biológico. **Estudios epidemiológicos**, como los resultados de las bombas de Hiroshima y Nagasaki, de niños irradiados intraútero, de adultos irradiados para el tratamiento de espondilitis anquilosante o bien para el carcinoma de tiroides, estudios en animales de diferentes especies y **estudios in vitro**, principalmente con DNA y linfocitos humanos, pudieron demostrar el efecto mutagénico de las radiaciones ionizantes que al parecer es mayor in vitro que in vivo.

## **INTRODUCCIÓN A LA BIOLOGÍA CELULAR**

Todos los seres vivos están constituidos por células, definidos como pequeños compartimentos rodeados por membranas y en cuyo interior contienen una solución acuosa de productos químicos. Las formas más simples de vida son células individuales que se dividen en dos para su propagación. Mientras que los organismos superiores son comunidades celulares donde las células se dividen en grupos para realizar funciones mas o menos especializadas y se relacionan entre si por complicados sistemas de comunicación.

### **Evolución celular**

Todos los organismos y todas las células que los constituyen derivan de un antecesor celular común por evolución. La evolución implica dos procesos esenciales:

- 1.-** La variación al azar de la información genética transferida de unos individuos a sus descendientes.
- 2.-** La selección de aquella información genética que posibilita a su poseedor una mayor probabilidad de conseguir descendencia.

Hace aproximadamente 3500 millones de años que apareció la primera célula en la tierra y ello debió de ocurrir a través de un proceso de agregación espontánea de moléculas. Actualmente se cree que las etapas que debieron de cubrirse fueron:

- 1.- La formación de polímeros de ácido ribonucleico (RNA) capaces de replicarse mediante apareamiento de bases complementarias.
- 2.- La aparición de mecanismos por los cuales una molécula de ARN diese directamente una proteína
- 3.- La formación de una membrana lipídica que encerrase esta mezcla autorreplicante de moléculas de ARN y proteínas. Más tarde ácido desoxirribonucleico (ADN) sustituiría al ARN como material genético.

Uno de los principales pasos evolutivos lo constituye la transición, acaecida hace aproximadamente 1500 millones de años, desde células pequeñas, con una estructura relativamente simple **procariontes**, las cuales incluyen varios tipos de bacterias, a la célula eucariótica de mayor tamaño y muchísimo más compleja.

### **La célula eucariótica**

Las células eucarióticas contienen por definición, núcleo, en el cual se encuentra la mayor parte de ADN celular, encerrado por una membrana de doble capa, la membrana nuclear. El resto del contenido celular, el citoplasma, en donde tiene lugar la mayoría de las reacciones metabólicas. En este último compartimento es posible distinguir distintos orgánulos, cada uno de ellos encerrados en su propia membrana, que realizan funciones perfectamente definidas. Las mitocondrias presentes en todas las células eucarióticas son responsables de la función respiratoria celular, y muestran muchas características comunes a los organismos procarióticos: *tienen una forma que recuerda a la de las bacterias, presentan capacidad de autopropagación con independencia de la célula en la que se encuentran, tienen ADN propio y ribosomas similares a los de las bacterias y diferentes a los de la célula eucariótica.*

Los cloroplastos sólo se encuentran en aquellas células eucarióticas capaces de llevar a cabo la función fotosintética, es decir, en células vegetales. Actúan de la misma manera que las cianobacterias (procariontes) absorbiendo energía luminosa por medio de la clorofila.

Las membranas además de rodear al núcleo, a las mitocondrias y a los cloroplastos forman también un intrincado laberinto, el retículo endoplásmico, donde se sintetizan los lípidos y las proteínas de las membranas junto con los productos a exportar fuera de la célula.

Los lisosomas, rodeados también por membranas, almacenan las enzimas requeridas en los procesos de digestión intracelular. Las membranas juegan también un importante papel en el proceso de entrada o salida de sustancias. Mediante la endocitosis, donde porciones de membrana se invaginan atrapando

material extracelular, lo incorporan como vesícula al citoplasma y mediante la exocitosis realizan el proceso inverso. Ambos procesos son únicos para las células eucarióticas.

Todas las células eucarióticas poseen un esqueleto interno, *el citoesqueleto*, el cual contribuye a darles forma, facilitando su movimiento y la distribución y transporte de los orgánulos. Está compuesto por filamentos proteicos, siendo dos de los más importantes los filamentos de actina y los microtubulos. Ambos son imprescindibles para los movimientos internos de la célula. Los microtúbulos constituyen el huso mitótico esencial para el reparto del material genético en la mitosis. Los filamentos de actina participan, en la contracción muscular.

### **Composición química de la célula**

Una célula viva está compuesta fundamentalmente por 6 elementos (C,H,N,O,P,S) que representan aproximadamente el 99% de su peso. La molécula más abundante, el agua, supone aproximadamente el 70%, por lo que la mayoría de las reacciones intracelulares ocurren en solución acuosa.

Los organismos vivos están fabricados a partir de un reducido número de pequeñas moléculas, basadas en el carbono y esencialmente las mismas para los diferentes tipos de organismos. Las principales son: azúcares, ácidos grasos, aminoácidos y nucleótidos. Los azúcares son la fuente primaria de energía química para la célula y se integran en polisacáridos para su almacenamiento. Los ácidos grasos aunque también son importantes como reservorio de energía, intervienen fundamentalmente en la formación de membranas. Los aminoácidos se polimerizan en proteínas, moléculas que suponen la más diversa y versátil macromolécula conocida. Los nucleótidos juegan un importante papel en la transferencia de energía, pero su principal misión consiste en ser las subunidades de las macromoléculas de la información (ADN y ARN).

### **Reacciones celulares**

Las células vivas están altamente ordenadas y deben de mantener y crear este orden a lo largo de su existencia. Esto es termodinámicamente posible gracias a la entrada continua de energía procedente de la radiación electromagnética del sol. Los animales obtienen esta energía por oxidación de moléculas orgánicas en una serie de reacciones, catalizadas por enzimas, acopladas para formar ATP. La molécula de adenosin trifosfato (ATP) es la forma comúnmente utilizada en todas las células para portar energía.

Las células animales consiguen energía de los nutrientes como las proteínas, los polisacáridos y los ácidos grasos rompiéndolos en pequeñas moléculas dentro de la célula produciendo moléculas de acetil CoA y una

limitada cantidad de ATP y NADH. Estas etapas proporcionan energía en ausencia de oxígeno. La acetil CoA se degrada en las mitocondrias dando CO<sub>2</sub> y protones. Los protones (H<sup>+</sup>) son transportados fuera de las mitocondrias. El gradiente de protones creado a través de la membrana interna está fuertemente dirigido a la síntesis de ATP.

La hidrólisis de ATP se encuentra acoplada a reacciones desfavorables energéticamente, tales como la síntesis de macromoléculas, normalmente a través de intermedios reactivos fosforilados. Otras moléculas reactivas de transporte, llamadas coenzimas transfieren otros grupos químicos en el curso de la biosíntesis.

### **Información genética**

La información genética está contenida en la secuencia de nucleótidos del ADN. Cada molécula de ADN contiene dos cadenas de nucleótidos complementarias que permanecen unidas por puentes de hidrógeno entre los pares de bases guanina-citronina (G-C) y adenina-timina (A-T).

La replicación del ADN, donde se duplica la información genética, se lleva a cabo por la polimerización de una nueva cadena complementaria de cada una de las dos viejas.

La expresión de la información genética implica la traducción de una lineal de nucleótidos de ADN, a una secuencia colineal de aminoácidos en las proteínas. Un segmento específico del ADN es copiado inicialmente en una cadena complementaria de un ARN, la cual es entonces traducida a proteínas de los ribosomas. Los aminoácidos utilizados para la síntesis de proteínas son llevados por pequeñas moléculas de ARN, los ARN-t, cada una de las cuales reconoce por complementariedad en el apareamiento de bases un grupo de tres nucleótidos de ARN-m. La secuencia de nucleótidos del ARN-m es traducida desde el principio hasta el final en grupos de tres bases de acuerdo con el código genético.

### **División celular**

El crecimiento y desarrollo de un organismo pluricelular depende de la proliferación coordinada de sus células. Este proceso de multiplicación por el cual una célula forma dos o más células, se conoce como división celular. La división celular lleva consigo dos procesos:

- 1.- citocinesis** o división de la entidad celular completa.
- 2.- cariocinesis** o división exclusiva del núcleo.

La cariocinesis implica un reparto del material genético, atendiendo a como se realiza, podemos señalar dos tipos:

**a.- mitosis**, división de los cromosomas en dos fracciones idénticas y cuya finalidad es simplemente la proliferación

**b.- meiosis** (exclusiva de organismos pluricelulares donde en algún momento de su ciclo vital existe la reproducción por fusión de dos gametos o sexual) donde los cromosomas denominados homólogos se juntan para separarse enteros, uno a cada polo.

Todas las células antes de dividirse pasan a través de una fase de duplicación del ADN por la que se producen dos moléculas idénticas a la original. Inicialmente, la molécula de ADN se separa deshaciendo su configuración de doble hélice de tal forma que nuevas bases complementarias se emparejan a cada una de las cadenas sencillas. Este proceso continúa gradualmente a lo largo de cada cadena hasta que se sintetizan dos cadenas completamente nuevas de ADN, complementarias de las originales. El proceso vital de la célula es cíclico y consta, además de la división celular (fase M) y de esta etapa de síntesis de ADN (fase S), de una fase G2 anterior a la división y de una fase G1 que precede a la de síntesis.

## RESPUESTA CELULAR. MECANISMOS DE ACCIÓN

Una posible respuesta a la radiación es la muerte celular antes que la célula entre en la mitosis (muerte en interfase). La célula muere sin llegar a dividirse los linfocitos, por ejemplo, la presentan a dosis muy bajas. Se supone que este efecto es consecuencia de cambios bioquímicos.

Otro posible efecto es el retraso mitótico que como su nombre indica es un retraso de la evolución normal hacia la mitosis y que suele dar lugar a una sobrecarga mitótica en el período post-irradiación ya que llegarán a la mitosis las células que les corresponde en evolución normal, más aquellas que se habían retrasado. Normalmente se define el índice mitótico como el cociente entre el número de células que están en mitosis en cada instante y el número total de células.

El tercer tipo de efecto que se observa, es el llamado *fallo reproductivo* que consiste en la incapacidad de las células para experimentar divisiones repetidas después de la irradiación (solo se pueden dividir una o dos veces).

La respuesta celular a la radiación se suele estudiar con las curvas de supervivencia celular (número de células supervivientes en función de la dosis).



Las curvas de respuesta resultan ser exponenciales, debido al carácter probabilístico de la interacción de la radiación con la materia. Así, si se irradia una población celular de  $n$  blancos, con una dosis dada, algunas células de la población sufrirán impactos en todos los blancos (lesión letal), otras células sufrirán impactos en solo algunos blancos (lesión subletal) y otras no sufrirán ningún impacto. A medida que aumenta la dosis hay mayor probabilidad que se produzca la ionización en zonas previamente impactadas, resultando las dosis altas, más eficaces para producir la muerte celular.

La curva de supervivencia celular se define mediante tres parámetros:

**n** = número de extrapolación

**Do.-** Dosis  $D_{37}$  =  $1/\text{pendiente}$ ; dosis que inactiva a toda la población menos al 37% (representa la radiosensibilidad de una población concreta).

**Dq.-** Dosis cuasi-umbral, que es la dosis en la cual la curva de supervivencia se hace exponencial. Ello se debe a las lesiones subletales a baja dosis.

A la hora de interpretar los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes podemos emplear dos enfoques distintos. El primero consiste en estudiar las modificaciones (lesiones) producidas a nivel de organismo y una vez caracterizadas correlacionarlas con cambios a nivel molecular; con el segundo se procede de forma inversa, una vez estudiadas las modificaciones a nivel molecular se intenta predecir lo que ocurrirá a nivel del organismo completo. Estos dos enfoques representan opciones extremas y de escasa operatividad. Habiéndose impuesto como solución de compromiso el enfoque celular.

El nivel celular ofrece un punto de equilibrio entre ambos; por un lado puede ser considerado la base de la comprensión de los cambios a nivel de tejido, órgano y organismo y por otro, representa el primer nivel de organización biológica en el que los cambios dependen y pueden ser correlacionados con alteraciones inducidas a nivel molecular.

Las células están constituidas por distintos tipos de componentes orgánicos como proteínas, carbohidratos, ácidos nucleídos y lípidos que forman el núcleo y el citoplasma, a su vez contienen varios orgánulos celulares entre los que hay que destacar los cromosomas que se encuentran situados en el interior del núcleo por su específica función en el control de las actividades celulares. Los cromosomas son portadores de genes, unidades de material genético responsable de transmitir la información hereditaria que contiene la célula. Los genes están formados por una macromolécula llamada ácido desoxirribonucleico (DNA).

Las células se clasifican en germinales y somáticas en función de que puedan dar lugar a otro ser, germinales, o no tengan esa capacidad. El número de cromosomas de las células somáticas es diploide e igual a 46 en todas las células somáticas de los seres humanos y haploide en todas las células germinales.

La división o multiplicación celular se hace a través de un proceso que se llama mitosis para las células somáticas y meiosis para las germinales.

### **Mecanismos de acción de la radiación sobre un material biológico**

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes representan la reacción de los seres vivos, para controlar la energía disipada por la radiación ionizante en los tejidos.

Al discutir los efectos biológicos producidos, es importante tener presente las siguientes generalizaciones:

**a.-** La interacción de la radiación a nivel celular tiene lugar al azar, o lo que es equivalente posee carácter probabilístico. Esta afirmación equivale a decir, que en el caso que incida sobre la célula una partícula ionizante, se puede producir o no interacción y en este último caso, pueden o no producirse daños.

**b.-** La interacción de la radiación en una célula no es selectiva, lo que equivale a decir que la energía procedente de la radiación ionizante se deposita de forma aleatoria en la célula. La radiación no muestra preferencia por ninguna estructura celular particular.

**c.-** Los cambios apreciables producidos en las células, tejidos y órganos como resultado de una interacción con radiaciones ionizantes no son únicos, al no poder distinguirse los daños producidos por otros tipos de trauma, por tanto la lesión producida es de carácter inespecífico.

**d.-** La acción de las radiaciones sobre las células es siempre de tipo lesivo, lo que puede aprovecharse, por ejemplo en radioterapia, para destruir células neoplásicas malignas (cancerosas).

### **ACCION DE LA RADIACION SOBRE EL MATERIAL BIOLOGICO**

Cuando las radiaciones ionizantes interactúan con la materia se produce una serie de fenómenos cuya consecuencia es la modificación de dicha

materia. El ser vivo se defiende de esta agresión mediante una serie de mecanismos que intentan la reparación de la alteración inducida. Según la efectividad de estos mecanismos la alteración será más o menos importante.

Se admiten, en la actualidad, una serie de etapas que intentan explicar las modificaciones que anteceden desde la absorción de la radiación hasta que se presenta la alteración en el ser vivo afectado y que son los siguientes, *considerando un organismo pluricelular*:

- ***Absorción de la radiación por el organismo.***
- ***Alteración de ciertas moléculas a causa de la modificación bioquímica.***
- ***Modificación bioquímica de la zona del organismo que ha absorbido la radiación.***
- ***Modificación de las células constituidas por las moléculas afectadas.***
- ***Modificación del tejido al que pertenecen las células alteradas.***
- ***Alteración del organismo pluricelular en su conjunto.***

Cuando las células absorben radiaciones ionizantes, tiene lugar un proceso de ionización y excitación. Los átomos y las moléculas ionizados y excitados se redistribuyen formando moléculas estables o inestables, o bien radicales libres, produciéndose nuevas reacciones químicas.

En cualquier parte de la complicada estructura de la célula pueden dar lugar a una serie de efectos nocivos, como son: *inhibición de la división celular, anormalidad en las funciones de la célula, muerte de éstas o alteración en la estructura de los genes de las células reproductoras*, que en definitiva podría dar lugar a cambios genéticos.

*El daño causado depende de la cantidad de energía absorbida, de la velocidad de absorción y del mecanismo seguido por ésta, y es acumulativo a lo largo de prolongados intervalos de tiempo.*

Los efectos biológicos de las radiaciones derivan de su capacidad de inducir ionizaciones, eyección de electrones cargados negativamente quedando el átomo cargado positivamente formándose el llamado par iónico, excitaciones moleculares, cambiando uno o varios electrones de órbita y procesos de ionización secundaria, ello se da por la acción de los radicales libres derivados de la irradiación de moléculas de agua intracelular, provocando una agresión celular.

Esta agresión se traducirá en una ***lesión celular***. Al irradiar una célula puede ocurrir que esta muera, letal, que se induzca una mutación lesión del DNA, o bien que se activen los mecanismos de reparación celular.

Se sabe que la célula posee mecanismos de respuesta a la radiación. Estudios realizados con linfocitos humanos expuestos primero a bajas dosis de radiaciones y después a elevadas se ha visto que el efecto de esta segunda radiación varía ya que la primera desencadena un mecanismo enzimático de reparación y la aparición de proteínas protectoras que hacen que disminuya el número de aberraciones cromosómicas.

La lesión a nivel de la secuencia de DNA nuclear se conoce como mutación de punto (no hacían referencia al número de pares de bases afectadas sino que incluían todas las modificaciones hereditarias que se expresaban por una función bioquímica determinada y que solo se detectaban gracias a la función genética es decir el fenotipo).

Actualmente mediante estudios moleculares se pueden observar las siguientes anomalías secundarias a la irradiación de DNA nuclear: roturas de una o ambas cadenas de DNA dando problemas en la reparación enzimática, degradaciones parciales, formación de dímeros entre bases adyacentes en una misma cadena, enlaces cruzados entre las dos cadenas, mutaciones o pérdidas de bases púricas o pirimidínicas.

Las mutaciones producidas por las radiaciones no son diferentes a las mutaciones espontáneas, lo único que ocurre es que aumenta el número de mutaciones espontáneas tanto en las células somáticas como en las células germinales, no se producen mutaciones específicas. Cualquier dosis de radiación puede interactuar con el material genético de la célula produciendo un aumento de las mutaciones espontáneas, no hay un umbral por debajo del cual esto no ocurra.

Se ha demostrado que hay zonas del DNA nuclear con diferente sensibilidad a las radiaciones, se ha visto que zonas ricas en enlaces de hidrógeno entre las bases nitrogenadas son más radioresistentes.

Todas estas anomalías en el DNA nuclear se traducirán en un bloqueo de la expresión, una formación de mensajes erróneos dando a nivel citoplasmático una síntesis de proteínas estructuralmente y funcionalmente anómalas, o bien tener un efecto indirecto sobre un mensaje transcrito al involucrar genes reguladores.

En ocasiones las mutaciones radioinducidas no son visibles y puede suceder porque célula no llega a dividirse y es lisada, porque se activen los mecanismos endógenos de reparación, pero también puede explicarse por una mutación producida en un gen que no se está expresando aquella célula determinada.

Las alteraciones a nivel molecular pueden traducirse a anomalías cromosómicas objetivables a microscopio óptico pudiendo ser estas de diferentes tipos:

Aberraciones numéricas, encontrando metafases con mayor o menor número de cromosomas. Parece ser que la incidencia de pérdida de un cromosoma sexual X es mayor cuando se irradia un gameto femenino que un gameto masculino.

Aberraciones estructurales, se ha visto por estudios citogenéticos por bandas Q y G que las zonas más pálidas o negativas tienen mayor número de roturas, es decir que las zonas con alto contenido de heterocromatina son más radiosensibles.

### **Las anomalías estructurales descritas postirradiación son:**

De tipo *cromátide*, suelen darse en la fase S o G<sub>2</sub> y en el estudio metafásico podemos observar roturas de estas cromátides. Cuando se observan cromátides multifragmentadas es lo que se conoce como pulverización cromosómica y ello se traduce en una imposibilidad total de reparación.

De tipo *cromosómico*, suele darse en fase G<sub>1</sub> y está en relación directa con la dosis. Estas lesiones pueden ser:

Inversiones; pericéntricas (incluyen centrómeros), paracéntricas (lejos del centrómero) Traslocaciones; son intercambios de fragmentos entre cromosomas del mismo o de diferente par, pudiendo ser a su vez de tipo Robertsonianas (equilibradas), o no equilibradas. Al parecer la traslocación se produce con más frecuencia cuando se irradia gametos masculinos que cuando se trata de gametos femeninos.

Formación de cromosomas anómalos (dicéntricos, tricéntricos, en anillo, fragmentos acéntricos...)

### **Condensación cromosómica desincronizada**

Son alteraciones durante la formación del huso mitótico dando lugar a cromosomas menos condensados que el resto de los cromosomas de la misma metafase.

Las diferentes lesiones cromosómicas ayudan a deducir el momento de la agresión y cual fue el fallo en el intento de reparación.

El incremento de probabilidad de que se produzca un efecto determinado (un tipo de cáncer o una mutación concreta) se podrá evaluar como:

$$(\text{probabilidad}) = \underline{m} (\text{dosis})$$

La pendiente  $\underline{m}$  (que depende evidentemente de la zona de la curva en que nos situemos) se llama FACTOR DE RIESGO y se mide en  $\text{Sv}^{-1}$ .

Por ejemplo el factor de riesgo medio para leucemia al irradiar médula a baja dosis es de  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ . y por ello significa que el incremento de la probabilidad de que aparezca leucemia se puede calcular multiplicando  $2 \cdot 10^{-3}$  por la dosis equivalente (en Sv) recibida en médula.

Se llama dosis de duplicación a la dosis que duplica la probabilidad de que aparezca un efecto.

Según la ICRP los factores de riesgo medios para los distintos órganos y tejidos son los siguientes:

#### **1.- Gónadas**

El factor de riesgo medio para efectos hereditarios en las dos primeras generaciones se toma como  $4 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ .

#### **2.- Hueso**

El factor de riesgo para cáncer de hueso se toma como  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$ .

#### **3.- Médula**

El factor de riesgo para leucemia se toma como  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ .

#### **4.- Pulmón**

El factor de riesgo para el cáncer de pulmón se toma como  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ .

#### **5.- Tiroides**

El factor de riesgo para el cáncer de Tiroides se toma como  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$ .

#### **6.- Mama**

El factor de riesgo para el cáncer de mama se toma como  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{Sv}^{-1}$ .

## 7.- Otros tejidos

El factor de riesgo para cáncer en otros tejidos u órganos no citados se toma como  $5 \cdot 10^{-3} \text{Sv}^{-1}$ . (estómago, glándulas salivares, hígado, etc.) y cada órgano aislado, no es responsable de más de 1/5 de este factor.

Si sumamos todos los efectos obtenemos un total de  $16,5 \cdot 10^{-3} \text{Sv}^{-1}$ .

Si definimos un factor de ponderación para cada órgano o tejido ( $W_T$ ) que represente la proporción de riesgo estocástico que resulte del órgano o tejido T, al riesgo total, cuando se irradia todo el cuerpo uniformemente, al valor  $16,5 \cdot 10^{-3} \text{Sv}^{-1}$  le corresponderá un factor de ponderación de 1; a cada uno de los órganos o tejidos anteriores, los valores siguientes:

Estos factores de ponderación ( $W_T$ ) son importantes porque a efectos de protección radiológica se define la dosis equivalente efectiva como

Donde  $H_T$  representa la dosis equivalente en el órgano o tejido T y  $H_{wb}$  la dosis equivalente efectiva en todo el cuerpo (o cuerpo entero) pudiendo así combinar el efecto de irradiaciones parciales de los distintos órganos y obtener un valor equivalente a cuerpo entero.

## MECANISMOS DE AGRESIÓN GEOTÓXICA

En este apartado presentamos una descripción de los mecanismos de alteración biopolímeros como consecuencia de una interacción con diversos agentes físicos y químicos. Pretendemos destacar que un mismo agente puede dar lugar a diferentes defectos si las circunstancias son distintas. Se ha intentado la máxima generalización, de modo que lleguemos a alcanzar un número reducido de tipos de mecanismos y una clasificación del modo de acción de los grupos de agentes más caracterizados.

### Tipos de mecanismos de lesión

Hay cinco grandes grupos de mecanismos:

- 1.- Radio y fotoquímica directa
- 2.- Química no radical
- 3.- Asociaciones no covalentes
- 4.- Radicales del agua
- 5.- Fotosensibilización

## **Radio y fotoquímica directa**

En este tipo de mecanismo es un monómero del biopolímero el que recibe de forma primaria el impacto de una partícula ionizante o la absorción de un fotón no ionizante.

Naturalmente entre la radioquímica y la fotoquímica existe la diferencia fundamental de que, en la primera, la absorción de energía es inespecífica por lo que es el componente ponderal mayoritario el que absorbe la mayor parte de energía. Por esta razón este efecto directo radioinducido es mínimo en solución o en medios acuosos.

En la fotoquímica directa la absorción del fotón es específica con independencia de la importancia ponderal del biopolímero pues el fotón sólo será absorbido por moléculas que posean niveles energéticos en sintonía con la frecuencia de radiación.

La excitación del momento puede conducir a reacciones que, vía radical o no, modifican el monómero. La ionización puede seguir el mismo camino si se produce la recombinación con un electrón termalizado, o puede dar lugar a radicales libres mediante la transferencia de electrón o la abstracción de átomo de hidrógeno.

## **Química no radical**

Consideramos con esta denominación las modificaciones covalentes que suceden mediante una reacción química que transcurre por una vía no radical.

## **Asociaciones no covalentes**

El carácter polifuncional de ácidos nucleicos y proteínas hace que sean grandes sus posibilidades de interacción no covalente con una extensa gama de compuestos.

## **Radicales de agua**

La aparición de radicales libres derivados de la descomposición del agua puede ser debida a una gran variedad de circunstancias.

La más conocida quizás sea la radiólisis del agua, a través de la cual sucede el llamado efecto indirecto de las radiaciones ionizantes. Las condiciones del medio, pH, concentración de oxígeno, etc., condicionan las concentraciones de los diversos radicales y la aparición de los radicales hidroperóxido.



Pero también los radicales del agua aparecen como intermediarios en las reacciones redox vía radical, concretamente entre peróxidos y metales pesados, que conducen a la aparición de radicales O y/o peróxido. Esta circunstancia se puede dar en cualquier peróxido y cualquier metal de transición dependiendo de su potencial redox y por tanto puede ser generado por desarreglos de los sistemas celulares de transporte de electrones, peroxidación de lípidos, etc., debidas a causas naturales o inducidas por la presencia de contaminantes como el ozono, el dióxido de nitrógeno, etc.

### **Acción fotodinámica. Fotosensibilización**

Designaremos este tipo de mecanismo como fotosensibilización ya que, debido a una definición histórica, se considera, en ocasiones, acción fotodinámica a la que requiere fotosensibilizador, luz y oxígeno, con lo que excluye vías de fotosensibilización.

### **Mecanismos de reparación del DNA**

La radiación ionizante actuando sobre DNA en un medio acuoso produce roturas de cadena, alteraciones de bases e incluso entrecruzamientos; de entre las roturas, unas son tales que pueden ser separadas por una enzima llamada ligasa; pero otras no.

Por otra parte la concentración de oxígeno, modifica la relación entre las frecuencias de bases alteradas y roturas. Es evidente que, en estas condiciones resulta complejo extraer rígidas conclusiones sobre los efectos que finalmente producirá un agresor determinado, ya que a las cuestiones referidas hay que añadir el hecho de que la respuesta celular ante una situación de este tipo no es en todos los casos la misma.

El gran número de agresiones a que está sometido el material genético y en consecuencia las lesiones en él inducidas haría muy difícil la supervivencia de los seres vivos de no existir un sistema de respuesta que permitiera su reparación. El conocimiento de los procesos biológicos por los cuales la célula es capaz de reparar, al menos hasta ciertos niveles, las lesiones causadas en su DNA cubre una doble vertiente; por una parte del proceso en sí de reparación de lesiones que perturban su invariabilidad, y por otra el mecanismo por el cual elude el efecto letal de una tasa de agresión para convertirlo en un mecanismo de evolución, ya que la mutación no debe entenderse únicamente en un sentido negativo.

Estos procesos de reparación igual que los de replicación, recombinación, mutagénesis, etc. están en muchas ocasiones estrechamente relacionados. En consecuencia no deben considerarse necesariamente

independientes sino integrantes de lo que puede considerarse metabolismo del DNA (Kornberg).

Las lesiones producidas en un DNA pueden conducir a tres situaciones diferentes: *la reparación correcta, la reparación incorrecta y la letalidad*. En el primer caso, el DNA después de la actuación de los mecanismos de reparación no ha sufrido ninguna modificación y conserva idéntica su información; Este caso se produce fundamentalmente cuando actúan los mecanismos de reparación denominados pre-replicativos y en algunas ocasiones, aunque con probabilidad mucho menor, tras la actuación de los mecanismos de reparación denominados post-replicativos.

La segunda situación conduce como hemos referido a mutaciones que se producen a consecuencia de que el propio sistema de reparación introduce errores, en estos casos fundamentalmente actúan los mecanismos de reparación post-replicativos. En la tercera de las situaciones referidas, los efectos letales se producen fundamentalmente cuando el daño no puede ser reparado por ninguno de los mecanismos anteriores; no obstante también puede responder a una reparación incorrecta que origine mutaciones cuyo efecto conduzca a la letalidad.

Mucho antes de conocer la existencia de mecanismos enzimáticos de reparación ya se pensaba que para un mismo daño la respuesta de la célula dependía de su estado fisiológico, y éste de las condiciones en que se realizara la experimentación. El primer fenómeno que implica la existencia de una reparación enzimática fue la observación de la recuperación de las células tratadas con luz ultravioleta al ser expuestas a la luz visible (fotorreactivación Kelner 1949).

Dos hechos condujeron a la constatación de que la capacidad de recuperación celular dependía de genes y enzimas, y no de circunstancias meramente fisiológicas. Estos hechos fueron: la identificación de los dímeros de pirimidina (1960) (principal lesión originada por la radiación ultravioleta) ) y el aislamiento de un mutante de E.Coli con elevada sensibilidad (1958). Estos dos hechos permitieron demostrar que los dímeros de pirimidina eran eliminados del DNA en bacterias radorresistentes y no ocurría así en los mutantes radiosensibles. Los trabajos posteriores han conducido al conocimiento actual a nivel molecular de los mecanismos de reparación.

### **Acción directa e indirecta de la radiación**

La acción de la radiación ionizante sobre las células, tejidos y órganos viene iniciada por procesos de excitación, ionización y radiolisis (rotura de enlaces químicos). La acción de la radiación sobre la célula se

puede clasificarse en directa e indirecta, según el medio donde se produzca la cesión de energía.

### **a.- acción directa**

La **acción directa** (de *DESSAUER* o de los impactos), consiste en que la lesión sobre la célula se realiza en el mismo sitio en que se absorbe la energía radiante y su explicación supone la aceptación de las llamadas teorías del impacto y del blanco.

La teoría de acción directa supone que entre el sitio de la absorción y el lugar de la lesión celular hay una distancia espacial (hasta 100 Å) y un tiempo de hasta  $10^{-5}$  seg. durante el cual los llamados radicales libres interaccionan químicamente con las moléculas de trascendencia biológica de la célula. Los radicales libres nacen de la interacción radiaciones ionizantes agua celular. En un primer momento hay una ionización del agua celular, que más tarde dará lugar a la formación de los citados radicales libres entre los que cabe citar como más importantes los siguientes OH, H, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HO<sub>2</sub>. Estos radicales libres se caracterizan por su gran agresividad química y se acepta que hasta el 65% de la lesión celular causada por las radiaciones ionizantes se debe a los mismos.

*Se entiende como impacto la ionización producida por los electrones que nacen en la interacción de la radiación electromagnética o bien de las partículas que directamente ionizan.*

*Se entiende como blanco aquella parte o partes de la célula cuya lesión es de máxima trascendencia para que la vida de la misma, o sea, que del impacto causado en una parte celular que no se considere como blanco puede no alterar la vida celular, mientras que si la interacción se realiza a nivel del blanco la vida celular puede afectarse notablemente.*

*Se basan en las siguientes consideraciones:*

- La energía radiante es *discontinua*, es decir, de naturaleza cuántica; esos cuantos portadores de energía son los fotones.
- La energía discontinua va a incidir sobre *un medio también discontinuo* como es el celular y sus componentes (núcleo, nucléolo, etc)
- De la interacción entre ambas discontinuidades se observa que las leyes que las rigen no son las de causa/efecto sino la del puro *azar y probabilidad*.

- Hay que recurrir, por tanto a la ley de probabilidades.
- Como la radiación actúa por impactos las consecuencias serán distintas *según que parte de los elementos celulares sean afectados*.

No todos los elementos constituyentes de la célula, tienen, biológicamente, *la misma trascendencia, para la vida de la célula*; así pues, según donde se de el impacto será afectada la vida celular en mayor o menor medida.

### **b.- Acción indirecta**

Fue instaurada por Rajewsky hacia 1931 y establece que las radiaciones ionizantes pueden actuar de otra manera, haciendo que su acción se realice *más lejos de aquí y más tarde de ahora*, mediante los llamados radicales libres, que ya fueron vislumbrados por Madame Curie.

Los efectos de los radicales libres en la célula se potencian por su capacidad para iniciar reacciones químicas y por tanto, *pueden producir lesiones en lugares distintos de su acción*.

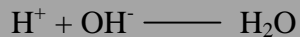
Puede que existan gran número de moléculas que no intervendrán en todo momento en la vida celular. Sin embargo, otras moléculas como el DNA sólo están presentes en la cantidad justa y necesaria y se precisan constantemente para que la célula funcione y viva de forma adecuada: *son moléculas clave de la célula*.

Como el DNA es la molécula del núcleo que controla todas las actividades celulares, se supone que una alteración del DNA tendrá para la célula consecuencias más graves que la alteración de otros constituyentes (*como enzimas o moléculas de agua*). Una ionización en el DNA puede representar una amenaza para la vida celular.

La teoría del impacto explica de forma bastante intuitiva la acción directa de las radiaciones ionizantes a nivel microscópico y macroscópico. Se supone que en la célula existen, moléculas que se pueden sustituir y moléculas claves que son únicas e insustituibles; estas son los blancos y sobre ellas se producen los impactos. Un blanco típico sería el DNA y los cambios en el DNA suponen cambios en la información genética, denominados mutaciones.

### **Las reacciones que se producen son las siguientes:**

De los productos formados, los iones tienden preferentemente a recombinarse mediante la siguiente reacción, no produciendo daño:



Los efectos de los radicales libres en la célula se deben a la capacidad de inducir variadas reacciones químicas que al programarse, pueden causar lesiones en la célula en zonas relativamente distantes del lugar de la interacción primaria.

Un ejemplo típico de reacción entre radicales libres es :



Reacción en la que se forma peróxido de hidrógeno, de fuerte carácter oxidante.

### **La inducción de mutaciones**

La mutación es una fragmentación cromosómica y por lo tanto también denominada aberración cromosómica o alteración estructural. Pueden suponer una alteración de las funciones celulares desde un mínimo, como fallos en la mitosis, hasta un máximo que provoque la muerte celular, o alterar la información que transmite una célula germinal.

Entre las lesiones celulares más típicas podemos citar las llamadas mutaciones que significan una alteración súbita de la función celular, alteración que además, se transmite a los descendientes de la célula. Estas mutaciones pueden ser somáticas o genéticas según se realicen en una célula somática o germinal. La trascendental es, sobre todo, la mutación genética puesto que es la que se transmite a través de las células germinales a las generaciones siguientes. Las células del organismo humano se dividen así en somáticas y germinales, las germinales son las del ovario y testículo y las somáticas todas las restantes.

Hay tres tipos principales de mutaciones cromosómicas que pueden ser inducidas por las radiaciones ionizantes:

#### **Mutaciones de tipo cromático**

En el cual se fracturan las dos cromátidas.

#### **Mutaciones de tipo cromátida**

En el cual se afecta solo una de ellas.

#### **Mutaciones de tipo subcromátida**

En el cual se afecta la mitad de una cromátida.

Cuando nos referimos a una respuesta de tipo aleatorio o estocástico, la relación respuesta biológica/dosis de radiación, es de tipo sigmoide.

Resulta afirmativo que la severidad de un efecto estocástico es independiente de la dosis; un incremento de dosis supone un incremento de probabilidad de ocurrencia, pero no un incremento de la gravedad del daño en sí. Una mutación que suponga una malformación de un descendiente se puede producir con un único fotón si se rompe un enlace clave de una molécula de DNA. Si inciden varios millones de fotones aumentará la probabilidad de producirse la mutación, pero no aumentará la gravedad de la mutación propiamente dicha.

Un incremento de la dosis significará un incremento proporcional de rupturas simples de cromosomas, número que no se verá afectado, en principio con la tasa de dosis. La tasa de dosis afectará sobre todo a las llamadas aberraciones complejas en los cromosomas. Para una aberración compleja no se precisa sólo que ocurran dos o más rupturas en un mismo cromosoma, sino que se produzcan con escaso intervalo de tiempo de separación, no pudiendo actuar los mecanismos de reparación.

Eventualmente, una mutación podrá representar una mejora biológica, y de hecho se reconocen casos en que es así, pero en Radiobiología se acepta el hecho de que una mutación es un perjuicio para la célula, el organismo y por lo mismo para la especie.

Todos los seres vivos presentan de forma espontánea un número de mutaciones que en el transcurso de la evolución se han acostumbrado a absorber, diluir y eliminar sin perjuicio aparente.

El peligro de las radiaciones no está en la producción de mutaciones en sí, sino en que son capaces de inducir un número de mutaciones superior al espontáneo. Situando el organismo en unas condiciones a las que no está acostumbrado y que en muchos casos no será capaz de superar.

### **Características que definen a una mutación**

- 1.-** Las mutaciones genéticas se deben a un solo impacto
- 2.-** La cantidad de mutaciones provocadas son directamente proporcionales a la dosis administrada
- 3.-** El porcentaje de mutaciones es independiente a la calidad de la radiación, exceptuando cuando se trata de radiación muy ionizante

- 4.- No se observa influencia del factor tiempo
- 5.- El proceso es independiente a la temperatura
- 6.- Aparecen en igual medida en células sexuales cualquiera que sea su estado evolutivo
- 7.- Las mutaciones no producen una pérdida de sustancia en el gen sino solamente una transformación

**Transferencia lineal de energía let.-** Es la cantidad de energía cedida al medio irradiado por micra de recorrido.

El efecto biológico dependerá de la capacidad de ionización que tenga la energía empleada:

*radiaciones de baja LET: RX y gamma*  
*radiaciones de alta LET: neutrones y partículas alfa.*

Por tanto, la irradiación de un mismo sistema biológico con radiaciones de distinta LET conducirá a distintos tipos de respuesta biológica.

**Las Radiaciones ionizantes de alta LET** ceden mucha energía en un pequeño recorrido; las células quedan muy lesionadas, existiendo, por tanto, *una relación lineal entre la fracción de supervivencia y la dosis.*

**En las Radiaciones ionizantes de baja LET** la cesión energética es menor y existe una mayor probabilidad de reparación celular.

Con relación a la transferencia lineal de energía denominada LET las aberraciones complejas no se suelen dar con radiaciones de baja LET sino preferentemente en las de alta LET. Así la gravedad o severidad de un efecto concreto no depende ni de la dosis ni de la tasa de dosis. Depende de la probabilidad que aparezca tal mutación. Sí dependen de la dosis, de la tasa de dosis y del LET, el tipo y número total de mutaciones que se producen.

Aunque a nivel microscópico, todos los efectos son estocásticos, a nivel macroscópico se hablará también de efectos no estocásticos que se producirán a partir de un cierto umbral de dosis y que serán interpretables considerando el conjunto de acciones microscópicas sobre un órgano o tejido.

## **Relación respuesta-dosis**

La relación entre la respuesta biológica a nivel microscópico, expresada como probabilidad de aparición de un efecto, y la dosis, es una curva de tipo sigmoide cuya forma es interpretable según la teoría del impacto.

La curva de respuesta en su parte inicial (bajas dosis) presenta una pendiente baja, debido a que en esta zona cada estructura celular ha recibido pocos impactos, y su efecto aún no es ostensible. Después de esta primera etapa, al existir ya muchas estructuras alteradas, basta un impacto adicional para que se manifieste el efecto, situación que corresponde a la parte central de la curva con pendiente alta: en ella pequeños incrementos de dosis suponen fuertes aumentos en la probabilidad de producción del efecto. Finalmente, la última zona con pendiente suave se puede interpretar como la arribada a la saturación, las estructuras celulares están ya dañadas gravemente y grandes incrementos de dosis producen sólo pequeños aumentos en el efecto observado.

### **Efectos probabilísticos y deterministas**

Los efectos biológicos de la radiación resultan de la manifestación de diversas anomalías patológicas debidas a los efectos de la energía depositada a nivel celular en los seres vivos. Estos efectos tienen una serie de características peculiares.

En primer lugar se debe conocer que las alteraciones producidas por las radiaciones solo se hacen ostensibles al transcurrir cierto intervalo de tiempo llamado periodo de latencia, que puede variar desde pocos minutos hasta incluso años.

En segundo lugar es importante la clasificación de estos efectos en dos grandes grupos:

#### **Efectos probabilísticos o estocásticos, cuyas características más esenciales son:**

- No presentan dosis umbral
- La probabilidad que aparezcan es proporcional a la dosis de radiación recibida
- Son siempre muy graves
- Se caracterizan por presentar un período de latencia generalmente largo. Un ejemplo típico de efecto probabilístico es el cáncer.

•

#### **Efectos deterministas o no estocásticos, cuyos atributos más importantes son:**



- Su gravedad depende de la dosis, existiendo una dosis umbral por debajo de la cual no se produce el efecto
- Su período de latencia es corto
- Los efectos deterministas son somáticos. Ejemplo de efectos de tipo determinista son: anemia, alopecia, radiodermatitis, cataratas, eritema, etc.

La notable diferencia entre ambos efectos en especial su gravedad, se debe a que un efecto probabilístico puede ser causado, por ejemplo, por la interacción de un fotón aislado, sobre una célula, con lo cual, la gravedad sólo depende del tipo de efecto, y no de la dosis de radiación que lo indujo. En cambio, depende de la dosis la probabilidad de aparición del efecto, esto es, su manifestación será tanto más probable cuanto más radiación se reciba. La gravedad del efecto biológico determinista depende de la dosis, *a mayor dosis recibida mayor gravedad del efecto*.

Los efectos probabilísticos de la radiación se presentan, por lo general, tardíamente y pueden afectar al individuo o a su descendencia. En el primer caso se habla de efectos somáticos y en el segundo de efectos genéticos.

### **Efectos somáticos**

Los efectos somáticos más importantes, que afectan a la salud del individuo son la leucemia y diversos tipos de cáncer.

### **Efectos genéticos**

Los efectos genéticos afectan a la salud de los descendientes del individuo expuesto y se deben a mutaciones que dan origen a malformaciones. Como son de carácter inespecífico, no pueden atribuirse con seguridad ningún tipo de mutación a la acción de las radiaciones. Por ejemplo, el Síndrome de Down en los seres humanos puede ser un efecto genético radioinducido o producido por otras causas.

### **Influencia de la dosis total y de la tasa de dosis en el efecto biológico**

Como los fotones pueden inducir, con una cierta probabilidad, radiolesiones a nivel celular, de las cuales unas pueden ser separadas y otras no. Es evidente, por tanto, que la gravedad del efecto biológico (determinista) puede considerarse dependiente de la dosis.

Además, la dosis recibida por el material biológico puede condicionar la capacidad de reparación. Como es lógico, una misma cantidad de radiación impartida en un instante corto de tiempo dará menos

probabilidades de recuperación a una célula o población de células, que si esa misma dosis se distribuye a lo largo de un periodo dilatado de tiempo.

## **Lesiones cromosómicas**

Los cambios estructurales importantes que se producen en los cromosomas por la acción de la radiación, se denominan aberraciones, lesiones o anomalías, que pueden ocasionar efectos cuyas consecuencias pueden ser mayores que en el caso del DNA.

La radiación puede originar cambios estructurales en los cromosomas, entre los que se encuentran:

### **Rupturas simples**

#### **De un brazo de un cromosoma**

Este tipo de ruptura suele ser compensado por los enzimas de reparación que restituyen la arquitectura normal del cromosoma, pero en ocasiones se producen soldaduras irregulares dando lugar a cromosomas dicéntricos o fragmentos acéntricos, lo que supone una alteración importante en la información transmitida a las células hijas.

#### **De un brazo de dos cromosomas**

Como consecuencia pueden intercambiarse los fragmentos dando lugar a una traslocación, o producirse la pérdida de un fragmento en el momento de la división (delección).

### **Rupturas dobles**

#### **De un brazo de un cromosoma**

Dando lugar a la pérdida de un fragmento (delección) o la inversión de dicho fragmento, alterándose el orden de las bases nitrogenadas del DNA.

#### **De los dos brazos de un cromosoma**

Dando lugar a la inversión, bien a la formación de un anillo cromosómico y un fragmento acéntrico.

Aunque es difícil que una célula portadora de mutaciones cromosómicas pueda completar los procesos de división, y lo normal es que muera, las consecuencias de los procesos mutacionales, pueden ser graves,

especialmente si afectan a células germinales, pues pueden ser causa de una amplia gama de alteraciones y anomalías hereditarias en la descendencia.

Las radiaciones de alta transferencia lineal de energía (LET) poseen capacidad de producir una alta densidad de ionización en su recorrido en la materia, dosis iguales de distintos tipos de radiación, producirán distintos grados de respuesta.

### **Radiosensibilidad.**

Las radiaciones son capaces de provocar, según se ha dicho, lesiones de importancia variable en la célula. La mayor o menor afectación, que depende de la población celular investigada, se denomina radiosensibilidad.

La radiosensibilidad puede referirse a cualquier fenómeno celular, pero corrientemente se toma como base la muerte de la célula. Así, cuando se afirma que una determinada población celular es muy radiosensible, se entiende que con una dosis baja de radiación muere una fracción importante de células de la población estudiada.

Resultados experimentales han permitido establecer que, generalmente, la radiosensibilidad es comparativamente mayor en células que no están diferenciadas, que son activamente mitóticas y que tienen un largo porvenir de divisiones (ley de Bergonie y Tribondeau).

Esta ley se cumple en un gran número de casos. Por ejemplo en el testículo, la espermatogonia es la célula madre no diferenciada mientras el espermatozoide es la célula diferenciada. La ley de Bergonie y Tribondeau predice que la espermatogonia debe ser radiosensible y el espermatozoo radorresistente, como así confirma la experiencia.

Se debe indicar que el cumplimiento de la ley citada no es completamente general. Una curiosa excepción es el linfocito, célula diferenciada y de alta especialización que resulta ser muy radiosensible.

Los efectos de la radiación sobre tejidos u órganos son consecuencia de los daños producidos sobre las células que lo componen y de hecho se observa distinta radiosensibilidad en tejidos según sea la relación entre células diferenciadas y no diferenciadas y su mayor o menor actividad mitótica.

De modo general un tejido está compuesto por células de distintos tipos y características, patentizándose más la acción de la radiación en aquellos tramos celulares más sensibles. Así, por ejemplo, la piel presenta una alta radiosensibilidad respecto a la depilación, debido a la gran actividad mitótica de las células que integran el folículo piloso.

## **Respuesta celular a la radiación**

La respuesta celular a la radiación se suele estudiar mediante las denominadas curvas de supervivencia celular, o representación en coordenadas semilogarítmicas, de la dosis en función de la fracción celular superviviente.

### **Muerte celular en interfase**

Una de las posibles respuestas de la célula a la radiación, es la muerte antes de entrar en mitosis, que se denomina muerte en interfase.

El origen de este efecto es la exposición por parte de las células a dosis suficientemente elevadas: la dosis que provoca esta respuesta puede variar dependiendo del tipo de células. Por ejemplo, los linfocitos presentan la muerte en interfase a dosis absorbidas inferiores a 500 mGy, sin embargo las levaduras soportan valores mucho más elevados ya que tras una dosis de 300 Gy sólo puede producir muerte en interfase en el 50% de la población.

### **Retraso e índice mitótico**

Se define el índice mitótico como el cociente entre el número de células que en cada instante están en mitosis, y el número de células total de la población.

La irradiación perturba el equilibrio mitótico. Las células que se encuentran en mitosis en el momento de la irradiación completan su división, pero aquellas que se encuentran a punto de dividirse se retrasan permaneciendo más tiempo en la fase  $G_2$  del ciclo celular. Por esta razón el índice mitótico disminuye, manteniendo un valor inferior al de preirradiación. Si la dosis absorbida es baja pueden producir procesos de recuperación, lo que origina una sobrecarga mitótica, hay células que no se han visto afectadas por la irradiación y continúan dividiéndose y células que sufrieron retraso pero que se han recuperado. Al cabo de un tiempo el índice retorna los valores iniciales a la irradiación. Sin embargo a dosis altas el índice mitótico se estabiliza en valores más bajos que el inicial.

### **Fallo reproductivo**

Se define el fallo reproductivo como la disminución del porcentaje de células supervivientes a la irradiación con capacidad reproductiva.

Este efecto se explica a partir de la teoría del impacto, según la cual la capacidad de reproducción de una célula está relacionada directamente

con la integridad de los cromosomas, por tanto cualquier lesión de estos puede producir muerte celular.

## **Factores que influyen en la respuesta (químicos, físicos y biológicos)**

### **Factores químicos**

Existen muchos compuestos químicos que pueden modificar la respuesta a la radiación: según el efecto que originan se pueden clasificar en dos grupos.

#### **Radiosensibilizadores**

Son compuestos que aumentan el efecto letal celular, producido por una determinada dosis de radiación. Un ejemplo típico de radiosensibilizador es el oxígeno, lo que se traduce que con una mínima dosis de radiación se produce mayor porcentaje de muerte celular si hay exceso de oxígeno en el tejido que si hay defecto.

#### **Radioprotectores**

Son compuestos que reducen los efectos producidos por la radiación a nivel celular. Estas sustancias deben estar presentes en el momento de la irradiación; administradas posteriormente, carecen completamente de efecto protector. Un grupo de sustancias con estas propiedades son las que tienen en su molécula un grupo sulfhidrilo (SH), tales como la cisteína y cisteamina.

### **Factores físicos**

Un factor físico de gran importancia en la respuesta a la radiación es la transferencia lineal de energía de la radiación considerada. De forma simplista pero muy útil en Radiobiología se habla de radiación de baja LET y de alta LET: *tanto electrones como fotones se engloban en el grupo de radiación de baja LET.*

### **Factores biológicos**

Entre los factores biológicos debe destacarse la distinta respuesta a la radiación en función de la fase del ciclo reproductivo en que se encuentra la célula. Se ha observado que la máxima radiosensibilidad se produce en la fase G<sub>2</sub> y M, menor en G<sub>1</sub>, alcanzándose un mínimo en la fase de duplicación del DNA.

Otro factor biológico importante es la capacidad de las células para la reparación de las radiolesiones subletales. No produce el mismo efecto la recepción de una dosis alta de radiación en un tiempo corto, que recibir la misma dosis de manera fraccionada, es decir, mediante fracciones sucesivas de radiación en un determinado período de tiempo. En el segundo caso la célula puede poner en funcionamiento sus mecanismos de reparación y el daño consecuentemente es menor que en el primer caso.

### **Respuesta sistemática a la radiación**

La respuesta a la radiación de un sistema u órgano se define como los cambios morfológicos y/o funcionales, visibles o detectables, producidos por la radiación ionizante.

La respuesta es función de la dosis y del tiempo transcurrido entre la irradiación, y el instante en que se realiza la valoración.

Un sistema biológico presenta una respuesta a la radiación dependiente de la radiosensibilidad de los órganos que lo integran. Igualmente la respuesta de un órgano depende de la radiosensibilidad de los tejidos que lo forman, tanto del parénquima como del estroma, así como de sus respectivas poblaciones celulares.

A efectos del estudio de la radiosensibilidad de los tejidos, conviene clasificar los sistemas en los siguientes grupos:

#### **Sistema de renovación rápida**

En los que la renovación celular es rápida (días o semanas), como ocurre, por ejemplo, en la piel o en médula ósea.

#### **Sistema de renovación, condicional**

En los cuales la población celular permanece fija, renovándose únicamente las células que mueren o se alteran por la acción de ciertos traumas. Tejidos que integran este grupo son por ejemplo el hepático o el renal.

#### **Sistemas estáticos**

En los que no existe reproducción celular, como en el caso del sistema nervioso.

Dado que la gravedad, el tiempo de respuesta, y el tiempo que tarde en aparecer el efecto de radiación depende de la dosis absorbida, se hace

necesario asociar esta magnitud con la respuesta. La referencia general se escalona en tres grados:

- **Dosis alta:** superior a 10 Gy
- **Dosis medias:** entre 1 y 10 Gy
- **Dosis bajas:** menores de 1 Gy

## **Efectos inmediatos y tardíos**

La respuesta morfológica de un órgano a la radiación se produce en dos fases generales:

### **Cambios iniciales**

Que se producen en los seis primeros meses de postirradiación y que son resultados de las lesiones celulares. Según las dosis recibidas, estos efectos pueden ser reversibles e irreversibles. Son ejemplos de alteraciones inmediatas o iniciales típicas, las debidas a modificaciones en la permeabilidad celular, tales como, las inflamaciones, edemas y hemorragias.

### **Cambios tardíos**

Que se producen después de seis meses de postexposición. Estos cambios son consecuencia de otros iniciales irreversibles, pueden variar desde mínimos hasta graves, y son, permanentes, irreversibles, y habitualmente progresivos. Ejemplos de alteraciones tardías características son: fibrosis, atrofas, ulceraciones, necrosis, etc.

## **Efectos reversibles e irreversibles**

Son efectos reversibles aquéllos, que tras un período de manifestación, van desapareciendo progresivamente debido a la recuperación del órgano afectado.

Son efectos irreversibles aquellos cuyos daños son más o menos persistentes debido a una insuficiente recuperación. Un efecto irreversible puede significar una reducción de la capacidad funcional de un órgano, al disminuir su población celular especializada.

## **La curación de radiolesiones**

El proceso de curación de una radiolesión puede realizarse de dos maneras:

### **Regeneración**

Proceso en el que la sustitución de células dañadas se realiza por el mismo tipo de células existentes antes de la irradiación. La regeneración produce una restitución total o parcial de las funciones del órgano, por lo que éste no presenta apenas cambios tardíos residuales, si es que aparece alguno.

### **Reparación**

Mecanismo de sustitución de células dañadas originales por otras de distinto tipo. La reparación actúa con formación de una cicatriz (fibrosis). Este proceso no restaura el órgano a su condición normal anterior a la irradiación, lo que da lugar a la respuesta tardía.

## **RADIOSENSIBILIDAD DE ÓRGANOS Y SISTEMAS**

### **Sistema hematopoyético y sangre**

Las células sanguíneas se producen en los órganos hematopoyéticos a partir de células madre, que tras proliferar y diferenciarse dan lugar a las células hematopoyéticas circulantes. Los órganos hematopoyéticos son bastante radiosensibles mientras las células circulantes son radiorresistentes, a excepción de los linfocitos, muy radiosensibles.

Como consecuencia de la elevada radiosensibilidad de los precursores hematopoyéticos, dosis moderadas de radiaciones ionizantes pueden provocar una disminución de la actividad proliferativa de las células correspondientes a los dos primeros compartimentos (células cepa y proliferación- tránsito), lo que se traduce al cabo de un corto periodo de tiempo en un descenso del número de células funcionales de la sangre. La pérdida de leucocitos conduce tras la irradiación a una disminución, o falta de resistencia ante los procesos infecciosos. Por otra parte, la disminución del número de plaquetas, indispensable para la coagulación sanguínea, provoca una marcada tendencia a las hemorragias, que sumado a la falta de producción de nuevos elementos sanguíneos de la serie roja, puede provocar una grave anemia.

El período de tiempo hasta que se produce la crisis, cuando el número de las células circulantes en sangre alcanza un mínimo, tarda en aparecer algunas semanas. Solamente cuando las células maduras circulantes van muriendo y se requiere el aporte de nuevas células a partir del despoblado compartimento de precursores, en cuando aparece el efecto aparente de la radiación.

### **Sistema digestivo**



El sistema digestivo está formado por parte de la cavidad bucal, esófago, estómago, intestino delgado e intestino grueso. La parte más radiosensible es el intestino delgado.

Está formado por un revestimiento de células que no se dividen, que se descaman diariamente hacia la luz del tubo y son sustituidas por las nuevas células formadas en las criptas de Liebrekuhn. Al igual de lo que ocurre en la médula ósea, en esta región existe un comportamiento de células cepa, que se dividen activamente, y que por lo tanto tienen una elevada radiosensibilidad. La radiación puede llegar a inhibir la proliferación celular de las criptas. Por tanto, las vellosidades que liberan continuamente las células muertas de la superficie hacia la luz intestinal y que dependen de las criptas de Lieberkuhn para su reposición, pierden células y se achatan quedando parcial o totalmente denudadas.

Como consecuencia, se produce una disminución de la capacidad de absorción de materiales a lo largo de la pared intestinal. Así mismo. Se produce deshidratación y pérdida de electrolitos por paso de fluidos hacia la luz intestinal. Se puede producir también, una infección sistémica provocada por el paso de las bacterias que habitan normalmente en el tracto gastrointestinal hacia la corriente sanguínea a través de la pared intestinal. El sistema se encuentra revestido por una membrana mucosa que contiene células no diferenciadas y por ello radiosensibles, y células diferenciadas radiorresistentes.

La recepción de dosis moderadas y altas de radiación provocan inflamación en las membranas mucosas bucales (mucositis), y del esófago (esofaguitis). Mientras que en el caso de las dosis moderadas se alcanza la curación con un mínimo de alteraciones tardías, por el contrario, con las dosis altas se presentan cuadros de atrofia, ulceraciones y fibrosis en esófago. En el intestino delgado a dosis moderadas, el efecto es transitorio, produciéndose acortamiento de vellosidades. A dosis altas se inhibe la proliferación celular y queda lesionado el revestimiento, lo que da lugar a disminución de secreciones, pérdida de líquidos y electrolitos, y paso de gérmenes del intestino a la sangre, produciendo procesos infecciosos.

## **Piel**

La piel está formada por una capa exterior (epidermis), una capa de tejido conjuntivo (dermis) y una capa subcutánea de tejido graso y conjuntivo. La epidermis está formada por capas que contienen células que no se dividen (capa basal de la epidermis). Periódicamente se van perdiendo las células de la superficie de la piel y se reemplazan por las células formadas en la capa basal, células que en analogía con las citadas en los sistemas anteriores, también tienen una alta radiosensibilidad.

Después de aplicar dosis de radiación moderadas o altas, se producen reacciones tales como inflamación, eritema y desescamación seca o húmeda de la piel.

Los folículo pilosos, como tejidos en crecimiento activo, son radiosensibles, produciéndose una depilación temporal o permanente con dosis moderadas o altas.

Las dosis altas producen secuelas tardías como atrofia, fibrosis, ulceración necrosis y cáncer.

## **Ojo**

El cristalino contiene una población celular de división activa, que puede ser lesionado o destruido por la acción de la radiación. Debido a la carencia de mecanismos para la sustitución de células dañadas, estas forman una lesión denominada catarata.

## **Sistema reproductivo**

### **Masculino**

La mayor parte de los tejidos constituyentes del sistema reproductor masculino, son radiorresistentes a excepción de los testículos: estos contienen poblaciones celulares que no se dividen, los espermatozoides, radiorresistentes y poblaciones celulares que se dividen muy rápidamente, las espermatogonias radiosensibles.

Como consecuencia de la irradiación de los testículos se puede producir la despoblación de las espermatogonias, lo que se traduce en la disminución de nuevos espermatozoides, (células ya funcionales), aunque la fertilidad puede mantenerse durante un periodo variable atribuible a los radiorresistentes espermatozoides maduros. A este periodo le sigue, finalmente, otro de esterilidad temporal o permanente según la dosis recibida.

### **Femenino**

Los óvulos están contenidos en envolturas en forma de saco (folículos) que se denominan según el tamaño en: *pequeños*, *intermedios* y *grandes*. Los folículos pequeños son los más resistentes, los intermedios son los más radiosensibles y los grandes moderadamente radiosensibles. El proceso de

diferenciación de estas células a diferencia de los espermatozoides no es por división sino por maduración.

Después de irradiar los ovarios con dosis moderadas, existe un período de fertilidad debido a los relativamente radiorresistentes folículos maduros que pueden liberar un óvulo. A este período fértil le puede seguir otro de esterilidad temporal o permanente como consecuencia de las lesiones en los folículos intermedios, al impedirse la maduración y expulsión del óvulo. Posteriormente, puede existir un nuevo período de fertilidad como consecuencia de la maduración de los óvulos que se encuentran en los folículos pequeños, radiorresistentes.

La dosis necesaria para producir la esterilización varían en función de la edad, dado que a medida que se aproxima la edad de menopausia el número de oocitos primarios disminuye y por tanto la dosis esterilizante es más baja.

Tal como acabamos de observar, el ovario no es un órgano que mantenga una proliferación activa, como era el caso de los sistemas que anteriormente hemos citado y puede ser considerado como un ejemplo de un órgano de elevada radiosensibilidad, aunque en esta ocasión la sensibilidad no hace referencia a la capacidad proliferativa, sino a la maduración de las células.

## **RESPUESTA ORGÁNICA TOTAL A LA RADIACIÓN**

La respuesta orgánica total a la radiación viene determinada por la respuesta combinada de todos los sistemas irradiados. Sin embargo, dado que la radiosensibilidad y por tanto la respuesta, varía en cada sistema. La respuesta global quedará determinada por el sistema afectado más radiosensible. Por sus distintos condicionamientos se distinguirá entre el adulto, embrión y el feto.

En general se aprecia que la respuesta, sea de supervivencia o de cualquier efecto, depende de la dosis. Con referencia a la supervivencia, dosis crecientes provocan una disminución creciente del número de supervivientes y del tiempo de supervivencia.

### **Respuesta del organismo adulto: el síndrome de irradiación.**

#### **La dosis total porcentual**

Con objeto de poder comparar los efectos letales que producen distintos niveles de dosis, se suele utilizar el concepto de dosis letal

porcentual en función del tiempo, con una notación, que adopta la forma  $DL_{m/n}$  donde m y n significan respectivamente, tanto por cien de la población que sufre muerte, y días de supervivencia tras la irradiación. Por ejemplo, el término  $DL_{50/30}$ , significa la dosis letal necesaria para causar en promedio, la muerte del 50% de la población en un período de 30 días, tras la exposición. La  $DL_{50/30}$  en el hombre para una irradiación corporal total, se encuentra en el intervalo 2,5 -3 Gy.

## El Síndrome de Irradiación

La respuesta de un organismo adulto a una exposición aguda de irradiación produce una serie de signos y síntomas que se conocen como **SINDROME DE IRRADIACIÓN**, (SDI) cuyas condiciones de inducción son:

- La exposición del organismo debe extenderse a un intervalo de tiempo muy corto, a lo sumo del orden de minutos.
- La exposición a la radiación debe comprender la totalidad del organismo, o su mayor parte
- La irradiación debe proceder de fuentes externas al organismo

Con objeto de poder comparar los efectos letales producidos por diferentes niveles de dosis se suele utilizar el concepto de dosis letal porcentual en función del tiempo, con una notación de la forma  $DL\ 50/30$ , que significa la dosis letal necesaria para producir la muerte al 50% de la población expuesta al cabo de 30 días. Esta  $DL\ 50/30$  está en el orden de los 2,5 – 3 Gy para el hombre. (irradiación a cuerpo entero)

Representando el tiempo de supervivencia en función de la dosis recibida, se obtienen curvas que corresponden al llamado síndrome de la médula ósea. En ella, la muerte de los individuos se produce fundamentalmente como consecuencia de la lesión del sistema hematopoyético y en concreto por la destrucción de la médula ósea

Conviene tener en cuenta que los intervalos de dosis que se dan para cada síndrome no son específicos de los seres humanos, dado que los valores se han obtenido a partir de la respuesta de muy diversos animales a la irradiación corporal aguda.

La respuesta que se presenta a una dosis de irradiación corporal aguda y total se puede dividir en tres etapas:

- **Prodrómica.-** Se caracteriza por náuseas, vómitos y diarreas. Puede durar desde algunos minutos, hasta varias horas.

- **Latente.-** Ausencia de síntomas. Su duración puede variar desde minutos hasta semanas.
- **De enfermedad manifiesta.-** Aparecen los síntomas concretos de los sistemas lesionados, el individuo se recupera o muere como consecuencia de las radiolesiones. Varía desde minutos hasta semanas.

## **Embrión y feto**

Considerando que la radiosensibilidad está directamente relacionada con la actividad mitótica, podemos predecir la elevada vulnerabilidad del feto, no sólo a los efectos letales de la irradiación sino también a la inducción de anomalías congénitas.

La letalidad y anomalías inducidas por la irradiación en el embrión o feto dependen entre otros factores del tiempo de gestación en el que se produce la irradiación.

Dividiremos pues, al desarrollo fetal en tres periodos en los que se observa una probable aparición de diferentes efectos radioinducidos.

Cuando se produce la fertilización del óvulo comienza a desarrollarse una activa división celular. Antes de que el huevo se implante en la mucosa del útero puede producirse una elevada mortalidad, si bien, la irradiación en ese momento del desarrollo no origina anomalías congénitas. Una vez que haya tenido lugar la implantación y se inicie la diferenciación celular característica de la fase de la organogénesis, deja de ser probable que se produzca la muerte del embrión, pero si se producen anomalías estructurales y deformidades.

La radiorresistencia del feto aumenta durante la última fase del desarrollo al incrementarse el número de células diferenciadas y disminuir la actividad mitótica. Como consecuencia, en esta fase se produce un menor número de anomalías aparentes Así como una disminución en la incidencia de muertes tanto prenatales como neonatales.

En el caso de mamíferos que han recibido irradiación corporal total, se puede correlacionar la dosis recibida con el tiempo de supervivencia.

Al aumentar la dosis disminuye el número de supervivientes y el tiempo de supervivencia. Se definen tres síndromes de irradiación según sea el órgano cuyo fallo produce la muerte.

### **Síndrome de médula ósea**

Se produce en un intervalo de dosis 1-5 Gy, debido a la destrucción masiva de células precursoras hemáticas.

### **Síndrome gastrointestinal**

Se produce en el intervalo de dosis 5-10 Gy y es consecuencia principalmente de la destrucción del epitelio del intestino delgado.

### **Síndrome del sistema nervioso central**

Este efecto se presenta para dosis altas, mayores de 10 Gy, y se debe a lesiones generalizadas en neuronas.

La respuesta a una dosis de irradiación corporal total aguda se puede dividir en tres etapas:

#### **Etapas**

#### **Etapas predrómica**

Que se caracteriza por náuseas, vómitos y diarrea.

#### **Etapas latente**

Caracterizada por ausencia de síntomas

#### **Etapas de enfermedad manifiesta**

Donde se presentan los síntomas concretos de los sistemas lesionados.

### **Efectos específicos en óvulo o espermatozoide**

La irradiación a nivel de gónadas puede inducir ciertas mutaciones en óvulos y espermatozoides: los efectos observados, de carácter probabilístico, pueden constituir taras genéticas transmisibles a futuros hijos.

### **Efectos específicos en embrión y feto**

La fase más radiosensible en cuanto a la inducción de anomalías en el feto humano es la comprendida entre la segunda y la sexta semana de gestación. Si la irradiación se produce durante este intervalo de tiempo se observan anomalías relacionadas con el sistema nervioso central (retraso mental, lesiones en los órganos sensoriales y retardo en el crecimiento).

La irradiación durante el segundo y tercer trimestre da origen a menos anomalías en el sistema nervioso central. Sin embargo, pueden darse

trastornos funcionales, como la esterilidad, o efectos tardíos, como la leucemia.

## FACTORES DE RIESGO Y DE PONDERACIÓN

La relación respuesta-dosis en los efectos estocásticos no es de tipo sigmoide. El incremento de probabilidad,  $\Delta P$ , que se produzca un efecto determinado bajo la acción de un incremento de dosis  $\Delta D$ , se puede expresar como:

$$\Delta P = m\Delta D$$

Como ejemplo daremos algunos factores de riesgo medios para distintos órganos y tejidos:

- **1.- Gónadas:** Factor de riesgo medio para efectos hereditarios en las dos primeras generaciones  $10 - 13 \text{ Sv}^{-1}$
- **2.- Hueso:** Factor de riesgo para cáncer de riesgo  $5 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$
- **3.- Médula:** Factor de riesgo para leucemias  $2 \times 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$

# EPIDEMIOLOGIA

## Introducción

La epidemiología estudia las enfermedades que afectan simultáneamente o sucesivamente a los miembros de grupos más o menos extensos de población. El significado actual de la epidemiología es el fruto de dos grandes modificaciones: de una parte, *la ampliación del concepto de epidemia*, y de otra, *la aplicación de los estudios epidemiológicos* a todas las fases evolutivas de la enfermedad, tanto en momentos de presentación epidémica como no epidémica.

Los progresos en el conocimiento de las causas de las diversas enfermedades parecían reducir las epidemias y los estudios epidemiológicos al campo de las enfermedades transmisibles, por el contrario, la utilidad de los métodos epidemiológicos ha llevado a extender su aplicación a enfermedades tan alejadas de aquellas como el cáncer, las enfermedades cardiovasculares, los efectos de las radiaciones ionizantes, los accidentes, etc.

La estadística sanitaria nos ha permitido ver las verdaderas epidemias, es decir, aumentos relativos en la incidencia de una enfermedad, donde la observación directa es incapaz de advertirlas. En conclusión, el registro constante de los datos sanitarios y la observación adecuada de los mismos es una actividad fundamental para el conocimiento de las enfermedades.

## RADIACIONES IONIZANTES

El empleo de rayos X con fines diagnósticos y de los rayos X y los materiales radiactivos con fines terapéuticos, se extendió a los pocos años del descubrimiento de los rayos X por Röntgen en 1895 y de la radiactividad por Becquerel en 1896.

Se progresó en el empleo de la radiación, tanto en el campo diagnóstico como en el terapéutico, cuando en los años cuarenta, se hizo posible la producción artificial de formas radiactivas de los elementos químicos comunes. Más recientemente los refinados métodos computarizados han permitido aumentar enormemente la precisión en la localización de los órganos de la economía, explorando la absorción de los rayos X o la emisión de la radiación de los radionucleidos incorporados por dichos órganos.

Al tiempo que se producía este notable avance en el uso médico de la radiación y se extendía su empleo en todo el mundo se ha ido reconociendo la importancia tanto para los pacientes como para el personal sanitario, de limitar la magnitud de la exposición al mínimo necesario para los fines clínicos de la prueba o el tratamiento. Cuando se comenzaron a utilizar



radiaciones con fines clínicos se vio que las altas dosis originaban lesiones en los tejidos y podían inducir a la aparición de cáncer en las zonas irradiadas. Desde los años cuarenta se ha visto que incluso las dosis bajas pueden producir cáncer en los órganos irradiados, o defectos hereditarios (genéticos), si se afectan las células germinales (de ovarios o testículos).

No cabe duda que los riesgos derivados de la mayoría de los métodos de diagnóstico y tratamiento radiológico son mínimos en comparación con los beneficios que aportan. Sin embargo, los riesgos de irradiación de algunos de los métodos utilizados en el pasado fueron importantes, como en el caso de un preparado de Torio -el Thorotrast- usado en las arteriografías o el tratamiento de la espondilitis anquilosante severa con rayos X o inyecciones de Ra<sub>226</sub>. No obstante, en la actualidad, siguiendo las recomendaciones de la Comisión Internacional para la Protección Radiológica y de otros organismos nacionales e internacionales en cuanto a los requisitos de protección necesarios para el correcto empleo de las radiaciones ionizantes en medicina, los efectos indeseables se han minimizado.

## **METODOLOGÍA EPIDEMIOLÓGICA**

Para aplicar mejor el concepto de la moderna epidemiología, se la define como el estudio de la distribución de la salud y enfermedades en los grupos sociales (epidemiología descriptiva), así como de los factores que determinan su aparición y difusión en la población (epidemiología analítica).

El método epidemiológico puede ser cualquier método de estudio del hecho analizado, tanto cualitativo como cuantitativo. Sin embargo, hay cuatro tipo de estudios que son los más utilizados en epidemiología:

### **1º Epidemiología descriptiva**

a.- Estudios descriptivos

### **2º.- Epidemiología analítica**

b.- Estudios retrospectivos o estudios caso-control

c.- Estudios prospectivos o estudios de cohortes

### **3º.- Epidemiología experimental**

d.- Estudios de intervención.

## **EPIDEMIOLOGÍA DESCRIPTIVA**

Se ocupa de estudiar la frecuencia y distribución del fenómeno analizado en la población estudiada. Se trata, de la primera etapa de la acción epidemiológica; es decir, una simple observación de la realidad que conduce a

la formulación de una serie de hipótesis, sobre las posibles causas del hecho estudiado.

En esta fase hay que ser extremadamente cuidadosos, aplicando un criterio discriminatorio pues si no pueden falsearse nuestros resultados. En líneas generales debemos observar una serie de condiciones:

- a.- Usar siempre las mismas medidas de los fenómenos (tasas, índices, etc.)
- b.- Usar para comparaciones grupos de población homogéneos.

A modo de ejemplo, supongamos que realizamos un estudio para analizar la asociación entre las dosis de irradiación y la aparición de radiodermitis mediante un estudio retrospectivo de casos y controles.

Una vez seleccionados los casos, es decir los afectados de la radiodermitis y los controles, (personas de características lo más similares posibles pero no afectas), recogemos las lecturas de dosis de cada uno de los individuos incluidos en la investigación a partir de la información disponible. Pues bien, si los antecedentes de dosis de exposición no han sido consignados de igual forma en el historial dosimétrico las conclusiones estarían sesgadas.

Las variables analizadas en el estudio descriptivo van a ser todos los elementos que intervienen en el fenómeno epidemiológico, como son las respuestas a las preguntas siguientes:

- a.- **QUE** (el hecho de describir)
- b.- **CUANTO** (el número)
- c.- **QUIENES** (personas afectadas)
- d.- **DONDE** (lugar)
- e.- **CUANDO** (tiempo)

Del estudio descriptivo de estos eslabones nacerá el **COMO** y **el PORQUE**, proporcionando datos para una posible hipótesis, que será analizada en la Epidemiología Analítica y demostrada en la Epidemiología Experimental.

### **Descripción del fenómeno epidemiológico (QUE)**

Será el primer paso de la epidemiología descriptiva. Se estudiarán todos los síntomas, signos y pruebas analíticas que nos ayuden en la descripción en sí del proceso (por ejemplo, los signos clínicos de una enfermedad y análisis).

### **Distribución numérica (CUANTOS)**

La necesidad de medir la frecuencia exige el establecimiento de unidades. Con ellas, se hace posible la comparación entre frecuencias de diversos

fenómenos o entre la frecuencia con que un determinado hecho se presenta en diversas poblaciones.

Dato real, es aquel que señala la magnitud de cualquier fenómeno. El conocimiento de que en un pueblo han fallecido 10 personas en un año, es un dato real. Ahora bien, esto por sí sólo no nos da una idea suficientemente clara del problema y no tiene un verdadero significado, sino es comparándolo con otra magnitud, que lógicamente será la población, obteniendo así los datos relativos y surgiendo así los términos de RAZONES o PROPORCIONES, TASAS e ÍNDICES.

### **Razones o proporciones**

Son expresiones que indican el número de casos de una determinada clase, en relación con el número total de individuos. Miden siempre la importancia de un fenómeno. Su fórmula general es: **RAZON** = Dato real / Población total. Ahora bien, como esta cifra tiene que ser siempre inferior a la unidad y a veces la primera cifra significativa estaría en el lugar de las centésimas, milésimas, etc., es más fácil referir esta proporción a una potencia 10, es decir, la expresaremos en forma de tasas.

### **Tasas**

Cualquier dato real podremos expresarlo en forma de tasa, si referimos la cifra de aquel a un número base que sea una potencia de 10. El valor de las tasas deriva de que su carácter descriptivo unen una significación probabilística, en efecto, expresan el riesgo matemático (casos desfavorables/ casos posibles) de suceder el evento de que se trate.

### **Tasa bruta o tasa general**

Se toman en relación a la población total, sin tener en cuenta ninguna característica específica de esa población. **TASA** = Dato real x  $10^n$  / Población total

### **Tasa específica**

Se toma una parte de la población total (población parcial), en razón a una o más características. **TASA ESPECÍFICA** = Dato real x  $10^n$  / Población total. Los valores de n como potencia de 10, más comúnmente usados, para ambos tipos de tasas son:

- n=2.** tasas de letalidad, incidencia y prevalencia
- n=3.** tasas de mortalidad general, mortalidad por edades
- n=4.** tasa de morbilidad por una sola causa
- n=5.** tasa de mortalidad por una sola causa

## **Indices**

Son expresiones numéricas que indican, por medio de una breve cifra, la relación existente entre varios datos de una misma serie referidos a uno de ellos.

En realidad, tasas e índices son cosas muy parecidas, porque ambos son valores teóricos, cuya diferencia consiste en que los índices se usa como valor base el de una de las cifras de la serie numérica, a la que se da el valor 100, en tanto que en las tasas se usa siempre la población total o parcial y se refieren a una potencia variable de 10.

## **Personas afectadas (QUIENES)**

Es muy importante estudiar las características de las personas sobre las que incide el fenómeno epidemiológico estudiado. La descripción de las personas puede realizarse en relación a diferentes atributos, en función del estudio que estemos abordando. En nuestro caso las posibles exposiciones a las radiaciones ionizantes y sus posibles consecuencias:

- 1.- Edad
- 2.- Sexo
- 3.- Estado civil, tanto de hecho como de derecho
- 4.- Hábitos
- 5.- Profesión
- 6.- Cultura
- 7.- Factores socio económicos, etc.

## **Distribución del espacio (DONDE)**

Es bien sabido que existe una clara diferencia entre la distribución de las enfermedades producidas por las radiaciones ionizantes (radiodermatitis, trombopenia, etc.). Por esto es muy interesante estudiar estos factores.

## **Distribución en el tiempo (CUANDO)**

Es conveniente el estudio de la distribución cronológica de los procesos: por decenios, quinquenios, años, estaciones, meses, etc.

## **EPIDEMIOLOGÍA ANALÍTICA**

Se ocupa de analizar e interpretar los hechos observados a la luz de los datos aportados por la Epidemiología Descriptiva, con la finalidad de examinar las hipótesis sugeridas por esta.

Los estudios de Epidemiología Analítica suponen siempre una hipótesis previa y comportan la elaboración de dos series de datos, como mínimo, que serán objeto de comparación. Según el método utilizado se distinguen dos tipos de estudios analíticos: retrospectivos y prospectivos.

### **Estudios retrospectivos**

Son llamados también estudios caso-control, estudios de historias de casos o estudios por anamnesis. El objeto de estos estudios es comparar las características de un grupo de individuos afectados por el proceso a estudiar (grupo de estudio o casos), con otro grupo compuesto por individuos de características análogas en edad, sexo, etc. Pero no afectados del proceso en cuestión (grupo control).

Este método tiene las ventajas de la facilidad en la realización y la economía de tiempo y recursos humanos, y el inconveniente de los posibles errores que hagan heterogéneos los grupos de estudio y control seleccionados.

### **Estudios prospectivos**

Se les conoce también con los nombres de estudios de cohorte, estudios longitudinales o estudios de catamnesis.

Consisten en escoger un grupo de personas expuestas a un factor y otros grupos testigos no expuestos, y buscar la frecuencia con que se llegan a afectar a través del tiempo, mediante una vigilancia de éstos grupos en estudio. Tienen los inconvenientes de ser costosos y tardar mucho en suministrar resultados.

### **Estudios rekord-linkage o simnesis**

Se trata de una variante del método prospectivo, pues como en éste caso toda la información de rutina disponible relativa a un individuo.

Es ya clásico el estudio rekord-linkage acerca de los posibles efectos carcinogénicos de las radiaciones terapéuticas realizadas por BROWN y DOLL en 1.955. El grupo de individuos expuestos a la causa hipotética lo componían enfermos afectados de espondilitis anquilosante tratados mediante irradiación. Reuniendo información de modo diverso, sobre casos de leucemia y otras neoplasias registradas en miembros del grupo estudiado, pudo demostrarse que

si la irradiación había sido intensa aumentaba el riesgo de aparición de cánceres en los puntos irradiados.

## **EPIDEMIOLOGÍA EXPERIMENTAL**

El estudio epidemiológico experimental o de intervención es un procedimiento metodológico en el cual un grupo de individuos han sido divididos en forma aleatoria en grupo de estudio y grupo control o testigo, y analizados con respecto a algún factor de riesgo o alguna medida preventiva que se quiere estudiar o evaluar sus efectos.

### **Estudios epidemiológicos sobre la exposición a las radiaciones**

Desde comienzos de siglo se sabe que las radiaciones ionizantes son capaces de inducir efectos patológicos cuando interaccionan con los organismos vivos. El estudio de la frecuencia y distribución de estos efectos en la población expuesta, la emisión y en su caso la confirmación de hipótesis acerca de su forma de actuación, la evaluación de las medidas de prevención puestas en marcha, etc. Tienen en los métodos epidemiológicos un arma de gran utilidad y eficacia.

Si consideramos el momento en que aparecen los efectos, podemos hablar de efectos precoces y tardíos o diferidos. Los primeros se manifiestan en un corto período de tiempo y están ligados a altas dosis de radiación recibidas en un período de tiempo reducido. Los diferidos aparecen de forma insidiosa y se manifiestan después de largos períodos de tiempo (período de latencia o intervalo libre), e incluso puede que no se observen en el individuo irradiado, sino en sus generaciones sucesivas.

La determinación de los efectos diferidos inducidos por dosis bajas de radiación presentan diversas dificultades:

- Necesidad de manejar grandes volúmenes de población expuesta para que los resultados estadísticos sean suficientemente fiables. Se ha estimado (REISLAN y otros 1.976), que para el Reino Unido sería necesario un período de seguimiento de 34 años de toda la población profesionalmente expuesta a las radiaciones ionizantes para tener una probabilidad del 50% de detectar el supuesto aumento de riesgo de leucemia debido a las radiaciones con una confianza del 80%. A medida que las dosis son más pequeñas, es necesario un mayor número de personas.
- En cualquier caso la interpretación de los resultados será problemática sobre los cánceres y anomalías genéticas pueden tener causas muy variadas que no son bien conocidas; esto implica un análisis multivariante o una considerable dificultad en seleccionar

poblaciones testigo que se puedan considerar similares a la población de personal profesionalmente expuesto.

NO COPIAR

# CRITERIOS GENERALES SOBRE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

## Conceptos y objetivos

La protección Radiológica es una ciencia que, aplicada a las radiaciones ionizantes, pretende conseguir que los riesgos derivados de su utilización sean tan bajos como sea razonablemente posible.

Su aplicación debe conducir a normas, métodos de trabajo y garantías de seguridad que hagan mínimo el riesgo.

Están incluidos en la definición anterior: *el riesgo a las personas, el daño al medio ambiente y el daño a las cosas, que deben ser mínimos para obtener un determinado beneficio, y además, prevenir la ocurrencia de efectos deterministas y limitar la probabilidad de incidencia de los efectos probabilísticos hasta valores que se consideran como aceptables.*

## Organismos competentes

### Comisión Internacional de Protección Radiológica

De forma abreviada se la conoce como ICPR. Es una comisión independiente, conocida por expertos de reconocida reputación en el ámbito internacional, pertenecientes a diversos países, cuya misión fundamental consiste en promover y realizar estudios sobre la acción de las radiaciones ionizantes en los seres vivos y sugerir las normas oportunas en forma de informes y recomendaciones que habitualmente recogen después los distintos países en forma de normativa.

La ICRP es el Organismo encargado de establecer la filosofía de la Protección Radiológica, proporcionando las recomendaciones generales y fundamentales para utilizar de forma segura las radiaciones ionizantes.

Los anales de la ICRP se reconocen como los mejores y más actualizados documentos sobre los distintos temas de Protección Radiológica.

### La Comisión Internacional de Unidades Radiológicas

La Comisión Internacional de Medidas y Unidades Radiológicas (ICRU), se creó en 1.992. Su misión más importante se centra en hacer recomendaciones respecto a:

- a.- Magnitudes y unidades de radiación y radiactividad



- **b.-** Métodos de medida y campos de aplicación en Radiobiología y Radiología Clínica.
- **c.-** Datos y constantes físicas requeridas para la aplicación de estos procedimientos.

La ICRU también se ocupa en colaboración con la ICPR, en la elaboración de recomendaciones similares en el campo de la Radioprotección.

## **El Consejo de Seguridad Nuclear**

Organismo español, independiente de la Administración del Estado, competente en materia de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica.

Informa con carácter preceptivo al Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, teniendo sus decisiones técnicas carácter vinculante incluida la denegación

El CSN tiene asimismo la facultad de suspender actividades de instalaciones por razones de seguridad, así como proponer la anulación de licencias.

El CSN informa semestralmente al Congreso y al Senado.

## **La Comisión de Comunidades Europeas**

Este Organismo a través de las Direcciones Generales XII y XIII, realiza proyectos de investigación y evaluación de Protección Radiológica, que pueden convertirse en un momento, en directivas de ámbito europeo y son susceptibles de adquirir carácter de disposiciones en cada uno de los Estados miembros de la Comunidad Europea.

## **El sistema de limitación de dosis, criterios de justificación y optimización en protección radiológica**

La Protección Radiológica se basa en los siguientes criterios:

### **Justificación**

La justificación implica que, cualquier exposición a radiaciones ionizantes debe significar un beneficio a cambio, claramente positivo.

### **Optimización**

La optimización consiste en la elección de procedimientos, para lograr que el cociente riesgo/beneficio, sea lo más pequeño razonablemente posible. En relación a los pacientes, cualquier actuación encaminada a reducir la exposición a valores razonablemente bajos y obteniendo la información diagnóstica necesaria, objeto de la exploración radiográfica, es una acción en la que se está optimizando el uso de los rayos X.

### **Limitación**

Se acepta un nivel de riesgo máximo para los miembros del público y para el personal profesionalmente expuesto, y en función del mismo se establecen los límites de dosis (valores que no sólo no deben superarse, sino también alcanzar cotas lo más bajas razonablemente posibles).

Los límites de dosis se establecen para que el incremento de probabilidad de los efectos probabilísticos no supere un cierto valor, equivalente a que el riesgo máximo sea similar al de otras actividades humanas de reconocido nivel de seguridad, en las cuales la probabilidad de mortalidad anual media debida a riesgos ocupacionales, es igual a  $1/10^4$

Los límites de dosis se establecen muy por debajo del umbral de los efectos deterministas para que estos no se lleguen a producir nunca.

### **El criterio ALARA**

El llamado criterio ALARA, palabra que es el acrónimo de la frase “*As Low Reasonably Achievable*”, que significa “*el valor más bajo razonablemente alcanzable*”, se refiere a la continua aplicación de la optimización en la práctica diaria de la Protección Radiológica, es decir que el diseño y uso de aparatos generadores de radiaciones ionizantes deben ser tales, se tenga la seguridad que las exposiciones a la radiación se reduzcan al valor más bajo que sea razonablemente alcanzable, manteniendo una buena capacidad de diagnóstico.

Genéricamente, todas las actuaciones en Protección Radiológica en Radiodiagnóstico, tanto para el personal de operación como para miembros del público, pueden ser de alto rendimiento lo que conduce a relaciones coste/beneficio muy pequeñas, por ejemplo, la mejora del blindaje de una zona en la que actúa el personal de operación (sometido a niveles de radiación relativamente altos) tienen un coste relativamente bajo, pues el plomo es un metal barato, pero en cambio, se reduce sustancialmente el nivel de radiación, lo que conlleva una disminución sustancial del riesgo.

Con relación a los pacientes, la recomendación de la OMS sobre idoneidad de las exploraciones, aconsejan excluir aquellas no absolutamente necesarias, con poco rendimiento diagnóstico y un riesgo injustificado.

En principio, lo más importante, es tener en cuenta que si el rendimiento diagnóstico previsto sólo sirve para confirmar un diagnóstico o un prediagnóstico que ya es suficientemente claro, y lo único que se pretende es dejar constancia gráfica, la exploración prevista puede carecer de justificación, porque la relación coste/beneficio sería excesivamente alta.

### **Límites de dosis para los trabajadores profesionalmente expuestos y miembros del público**

Se consideran personas profesionalmente expuestas a la radiación aquellos trabajadores que por razón de su actividad laboral, habitual u ocasional, están sometidos a un riesgo susceptible de entrañar dosis anuales superiores a 1/10 de los límites anuales fijados para trabajadores.

Los aprendices y estudiantes que excepcionalmente durante el periodo de aprendizaje o estudio estén expuestos a radiaciones ionizantes, se encuentran excluidos de la anterior definición.

Se denominan miembros del público aquellas personas para las que sea muy improbable que reciban más de 1/10 de los límites anuales fijados para los trabajadores profesionalmente expuestos.

### **Límites de dosis anuales para el personal profesionalmente expuesto:**

**a.-** Límite anual para el caso de exposición total y homogénea del organismo:

- El límite anual de dosis para la totalidad del organismo, referido a cualquier periodo de doce meses consecutivos, es de 50 mSv.

**b.-** Límites anuales para el caso de exposición parcial del organismo:

- El límite anual de dosis para el cristalino es de 150 mSv
- El límite anual de dosis para la piel es de 500 mSv
- El límite anual de dosis para manos, antebrazos, pies y tobillos es de 500 mSv
- El límite anual de dosis para cualquier otro órgano o tejido, considerado individualmente, es de 500 mSv

### **Límites de dosis anuales para miembros del público**

Los límites de dosis para los miembros del público son 1/10 de los establecidos para el personal profesionalmente expuesto.

### **Límites de dosis especiales para mujeres**

- Para mujeres con capacidad de procrear, las dosis en el abdomen no deben sobrepasar de 13 mSv en un trimestre
- Para las mujeres gestantes, las condiciones de trabajo deberán ser tales que las dosis al feto desde el diagnóstico del embarazo hasta el final de la gestación, no exceda de 10 mSv.

En general, este límite se asegura colocando a la mujer en las condiciones de trabajo de los trabajadores profesionalmente expuestos pertenecientes a la categoría B

### **Límites especiales para personas cuya edad está comprendida entre 16 y 18 años**

- Los menores de 18 años (y mayores de 16) sólo pueden trabajar con radiaciones ionizantes por motivos de su formación, aprendizaje o adiestramiento.

Los límites que se aplican en estos casos son 3/10 de los límites para adultos.

### **Dosis no contabilizables a efectos de evaluación de dosis totales**

Las dosis de radiación recibidas como consecuencia de exploraciones y/o tratamientos médicos (como pacientes), no se contabilizan a efectos de superación de límites. Tampoco se contabilizan las dosis recibidas de radiación natural, ni las recibidas individualmente como miembros del público.

### **Exposiciones excepcionales**

En casos de accidente y de forma excepcional pueden presentarse situaciones que den lugar a exposiciones que impliquen recibir dosis superiores a los límites de dosis fijados para condiciones normales de trabajo, estas exposiciones tienen la consideración de Exposiciones Excepcionales y se clasifican en:

#### **Exposiciones de emergencia**

Aquellas de carácter voluntario en las que se sobrepasan los límites de dosis anuales establecidos para trabajadores y que están justificadas cuando se trata de prestar asistencia a individuos en peligro, de evitar la exposición de un gran número de personas o de salvar una instalación valiosa. Las personas que se presten a este fin deberán ser informadas de los riesgos que corren antes de intervenir en operaciones de este tipo.

Este tipo de exposición excepcional no se presenta en Radiodiagnóstico.

### **Exposiciones accidentales**

Aquellas de carácter fortuito e involuntario, en las que se sobrepasa alguno de los límites de dosis anuales establecidos para personal profesionalmente expuesto.

Como consecuencia de exposiciones excepcionales tanto totales como parciales, se evaluarán las dosis recibidas, si éstas fueran superiores a los límites anuales de dosis correspondientes, el caso será puesto inmediatamente en conocimiento de:

- El Servicio Médico autorizado
- El Consejo de Seguridad Nuclear
- El propio interesado

### **Recomendaciones de la ICRP con repercusión en aspectos generales de la protección radiológica**

Entre las recomendaciones de la ICRP, aún sin vigencia legal, pero que en el futuro se espera que se acepte en la mayoría de los países, figuran unos límites menores.

Para el personal profesionalmente expuesto, en el documento nº 60 de la ICRP, se recomienda un límite de 100 mSv a lo largo de 5 años, equivalente a un promedio de 20 mSv/año, si bien a lo largo de un año concreto se puede rebasar este límite, no pueden sobrepasar los 100 mSv a lo largo de 5 años.

En cuanto a los miembros del público el límite pasa de 5 mSv/año actualmente, a 1 mSv/año

Para mujeres gestantes profesionalmente expuestas, el límite de dosis al feto durante todo el embarazo pasa de 10 mSv a 2 mSv

# PROTECCIÓN RADIOLÓGICA OPERACIONAL

## Clasificación de los trabajadores profesionalmente expuestos

Por razones de vigilancia y control radiológico, los trabajadores profesionalmente expuestos se clasifican en dos categorías:

### **Categoría A**

Pertenecen a esta categoría aquellas personas que por las condiciones en que realizan su trabajo no es improbable que reciban dosis superiores a  $3/10$  de los límites anuales de dosis, siendo obligatorio que sean controlados radiológicamente mediante dosimetría personal.

### **Categoría B**

Pertenecen a esta categoría aquellas personas que por las condiciones en que realizan su trabajo no es improbable que reciban dosis superiores a  $1/10$  de los límites anuales de dosis, siendo muy improbable que reciban dosis superiores a los  $3/10$  de los límites anuales de dosis. Los trabajadores pertenecientes a esta categoría pueden ser controlados radiológicamente mediante dosimetría personal o de área.

Las instalaciones de radiodiagnóstico son, salvo excepciones, instalaciones de bajo riesgo para personal profesionalmente expuesto, siempre y cuando se practiquen criterios elementales de protección radiológica, como permanecer durante el disparo detrás de la mampara, junto al pupitre de control, de manera que, si no existen defectos de diseño, o blindaje, o ambos, la irradiación de este personal es muy poco significativa.

En salas de radiología especial, la permanencia en la sala puede ser inevitable, pero en este caso deben utilizarse mandiles, gafas, guantes plomados, etc. y dosímetros, emplazados en las zonas orgánicas que puedan quedar más expuestas a los rayos X.

Las dosis que reciben el personal profesionalmente expuesto es muy variable, dependiendo no sólo de la sala en que trabaje y de la presión asistencial que ésta tenga, sino también de la efectividad de los profesionales para limitar su propia irradiación.

Los criterios objetivos de clasificación deberían llevar a considerar al personal de radiodiagnóstico profesionalmente expuesto, casi de modo general, en la Categoría B. Determinadas salas (cateterismo,

angio/flobografías, radioquirófanos de traumatología, radiología intervencionista, etc.) hacen aconsejable que dicho personal se clasifiquen en categoría A y esté sometido a control dosimétrico personal, incluso con más de un dosímetro, al objeto de conocer las dosis recibidas en todo el organismo y en órganos aislados especialmente expuestos, por razón del tipo de exploración practicada. Los motivos no son tantos los valores altos de dosis que puedan llegar a recibirse, en circunstancias normales, como el riesgo de que, por inadvertencia, puedan permanecer en haz directo, pudiéndose irradiar, en tal caso, de modo importante.

La posición del CSN respecto a este problema es conservadora, en el sentido de exigir que el personal profesionalmente expuesto de radiodiagnóstico, con independencia de las salas en que trabaje, sea controlado por dosimetría personal, entendiendo que siempre existe riesgo de operación incorrecta, que puede suponer sobreexposición y no admitiendo, por tanto, dosimetría de área para estos trabajadores.

### **Vigilancia de las zonas de trabajo**

Las diferentes zonas de riesgo dentro de una instalación deben estar acotadas y señalizadas. Esta normativa implica por una parte el control de acceso a la instalación y por otra las condiciones de trabajo del personal.

La vigilancia de las zonas de trabajo es parte esencial para garantizar que el personal no recibe dosis superiores a los límites. Sus objetivos principales son los siguientes:

- a.-** Determinación de las condiciones de exposición a radiaciones del personal en condiciones normales de operación.
- b.-** Detección rápida de incidentes o accidentes provocados por fallos operativos del personal o por averías en los generadores y equipos de rayos X.
- c.-** Estimación de las dosis máximas que podrían recibir los trabajadores a causa de radiación externa

En instalaciones de radiodiagnóstico, debe controlarse únicamente la exposición externa y, en consecuencia, deben medirse los niveles de radiación. La vigilancia debe extenderse a toda la zona próxima a tales fuentes de radiación, incluidos los locales contiguos o zonas colindantes.

### **Clasificación de las zonas de trabajo**

Los lugares de trabajo se clasifican en función del riesgo de exposición en las siguientes zonas:

### **Zona de acceso libre**

Es aquella en la que es muy improbable recibir dosis superiores a 1/10 de los límites anuales de dosis. En ella no es necesario establecer medidas especiales en materia de protección radiológica.

### **Zona vigilada**

Es aquella en la que no es improbable recibir dosis superiores a 1/10 de los límites de dosis anuales, siendo muy improbable recibir dosis superiores a 3/10 de dichos límites anuales de dosis.

### **Zona controlada**

Es aquella en la que no es improbable recibir dosis superiores a 3/10 de los límites anuales de dosis, siendo muy improbable llegar a los límites. En estas zonas es obligatorio el dosímetro personal.

### **Zona de permanencia limitada**

Es una subzona en la zona controlada en la que la realización del trabajo durante todo el horario laboral, puede significar la superación de los límites anuales de dosis.

### **Zona de acceso prohibido**

Es igualmente una subzona de la zona controlada en la que es posible superar los límites de dosis anuales con una única exposición.

Las zonas existentes en una instalación de radiodiagnóstico pueden tener distintos niveles de riesgo, por lo cual deberán estar debidamente señalizadas.

El único riesgo que plantean los rayos X es la irradiación externa, circunstancia que será señalizada con un carte rectangular en cuyo centro irá dibujado un trisector (símbolo internacional de riesgo a la radiación) rodeado de puntas radiales y enmarcado por una orla rectangular del mismo color que el trisector. Los colores indicativos son:

<b>ZONA VIGILADA</b>	<b>gris azulado</b>
<b>ZONA CONTROLADA</b>	<b>verde</b>
<b>ZONA DE PERMANENCIA LIMITADA</b>	<b>amarillo</b>



## **ZONA DE ACCESO PROHIBIDO**

**rojo**

### **Clasificación de las zonas de trabajo en radiodiagnóstico**

Las salas de Radiodiagnóstico debe ser clasificadas como zonas controladas o vigiladas según el riesgo realmente existente y que en la práctica varía mucho entre el riesgo bajo de una instalación de Radiodiagnóstico Dental, hasta las zonas de alto riesgo de una Sala de Vascular.

### **Sistemas de acceso y de control**

Las zonas de riesgo en Radiodiagnóstico, tienen la característica de serlo durante un porcentaje relativamente pequeño de tiempo durante la jornada laboral (justo en los instantes en que se efectúan los disparos). Por ello, es conveniente, además de tener debidamente señalizada la zona, disponer de algún signo adicional, que advierta la emisión de rayos X en esos momentos.

Esto podría ser sustituido por un bloqueo automático o manual de las puertas de acceso a la sala, mientras se produce la exposición.

La experiencia demuestra, que se evitan muchas exposiciones accidentales, si se indica con claridad en los accesos, el procedimiento a seguir para realizar consultas al personal de la sala.

El acceso a zonas vigiladas y controladas en una instalación de Radiodiagnóstico estará limitado a personas que posean la debida autorización.

En régimen de trabajo puede acceder a una zona vigilada cualquier trabajador profesionalmente expuesto sometido a control dosimétrico, sea personal o de área. En cambio en una zona controlada, igualmente en régimen de trabajo, sólo puede acceder el personal de categoría A, provisto de dosímetro personal.

### **Vigilancia dosimétrica del personal**

La dosimetría personal consiste en la asignación de uno o más dosímetros individuales, durante un cierto intervalo de tiempo (habitualmente de una mes), a cada persona, para determinar las dosis que reciben en el desarrollo de su trabajo.

Cuando se utiliza un único dosímetro, su lectura (dato que los centros de dosimetría suelen asignar a dosis profunda) suelen asimilarse, a la dosis equivalente efectiva.

Si el riesgo de irradiación específico de algún órgano (manos, por ejemplo) requiere utilizar un dosímetro adicional, su lectura se asimilará a la dosis recibida por ese órgano.

Los resultados de la dosimetría personal deben ser cuidadosamente analizados por los responsables de la instalación y por los propios interesados, para optimizar la protección radiológica.

**Para las personas profesionalmente expuestas pertenecientes a la categoría A es obligatorio:**

- 1.- Utilizar dosímetros individuales que midan la dosis externa representativa de la dosis para la totalidad del organismo durante toda la jornada laboral
- 2.- Utilizar dosímetros adicionales en zonas corporales potencialmente afectadas, en el que caso que algunas partes del organismo puedan quedar específicamente expuestas a la radiación.

**Para las personas profesionalmente expuestas de categoría B, la reglamentación establece lo siguiente:**

- 1.- No es preceptivo el uso de dosímetro personal, siempre y cuando exista dosimetría de área o de zona, en los lugares de trabajo
- 2.- La estimación de la dosis puede efectuarse mediante dosimetría de área.
- 3.- Si en la instalación no hay dosimetría de área, deberán utilizarse dosímetros individuales.

**Requisitos de resultados dosimétricos**

Es obligatorio registrar todas las dosis recibidas durante la vida laboral del personal profesionalmente expuesto en un historial dosimétrico individual.

Las posibles dosis recibidas en exposiciones excepcionales, figurarán en el historial dosimétrico, registradas por separado, de las recibidas en el trabajo en condiciones normales.

El historial dosimétrico debe figurar además en la documentación laboral sanitaria de cada trabajador.

La información del historial dosimétrico es confidencial y únicamente se podrá poner a disposición del CSN. No se podrá comunicar a otras entidades sin consentimiento expreso del trabajador.

El titular de la actividad transmitirá los resultados de los controles dosimétricos al servicio médico que deberá interpretarlos desde el punto de vista sanitario. En caso de urgencia, dicha transmisión deberá ser inmediata.

Los historiales dosimétricos y otros documentos de interés deben ser archivados por el titular de la instalación durante un periodo mínimo de 30 años contados desde el cese de la actividad como profesionalmente expuesto.

Al cesar el trabajador en su empleo, el titular de la instalación deberá proporcionarle una copia certificada de su historial dosimétrico, que deberá aportar si vuelve a trabajar en otra instalación radiactiva.

Si el titular clausura la instalación, se hará entrega de los historiales dosimétricos al CSN.

En el historial del personal de categoría A, se registrarán como mínimo, las dosis mensuales y las acumuladas durante 12 meses consecutivos.

En el caso del personal de categoría B, se registrarán las dosis anuales, determinadas o estimadas, a partir de la dosimetría de área.

Los trabajadores profesionalmente expuestos que actúen en más de una instalación, deben comunicar las dosis recibidas en cada instalación a todos los responsables de la radioprotección de las restantes instalaciones, a fin de tener en cada una de ellas los datos de las dosis totales.

Al cambiar de instalación, el trabajador deberá aportar además del historial médico, la copia certificada de su historial dosimétrico, que preceptivamente le debe ser entregada como se ha indicado anteriormente.

### **Examen de salud previo y periódico**

La vigilancia del personal profesionalmente expuesto será realizada por un servicio médico especializado, propio o contratado, con capacidad reconocida oficialmente a estos extremos por el Ministerio de Sanidad y Consumo, previo informe del CSN.

El examen de salud previo de toda persona que vaya a trabajar con radiaciones ionizantes tendrá por objeto la obtención de una historia clínica completa para apreciar el estado general de salud y el de los órganos o

aparatos que se estimen puedan ser afectados con mayor probabilidad, por la exposición a radiaciones ionizantes.

La vigilancia médica periódica de los trabajadores profesionalmente expuestos tiene como objetivos comprobar el estado sanitario general y determinar el estado de los órganos expuestos y sus funciones.

Como resultado de los exámenes médicos, la persona puede ser declarada apta, apta condicionalmente y no apta (para el trabajo con radiaciones ionizantes).

Los trabajadores profesionalmente expuestos, estarán sometidos a exámenes de salud, con una periodicidad mínima anual que permitan comprobar que siguen siendo aptos para ejercer sus funciones.

Además de los reconocimientos anuales, pueden practicarse reconocimientos médicos adicionales adaptados a la importancia de la exposición, y su frecuencia dependerá del estado de salud del trabajador, de las condiciones de trabajo y de los incidentes que puedan hacerlos convenientes, a juicio del responsable del servicio médico.

La Guía de Seguridad 7.4 del CSN (Bases para la vigilancia médica de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes), indica las áreas que el CSN estima que debe cubrir, como mínimo, la vigilancia médica del personal profesionalmente expuesto, siendo criterio fundamental para su elección los riesgos radiológicos derivados de la actividad del trabajador.

El servicio médico correspondiente podrá determinar la conveniencia de que se prolongue todo el tiempo que se estime necesario, la vigilancia médica del trabajador, incluso cuando haya cesado en su trabajo con radiaciones ionizantes.

### **El historial médico**

A cada persona profesionalmente expuesta le será abierto un protocolo médico que debe contener:

- Los resultados del examen médico previo
- Los resultados de los reconocimientos médicos periódicos
- Los resultados de los reconocimientos médicos eventuales
- El historial dosimétrico adicional donde se registren las estimaciones de dosis recibidas por diagnóstico y/o por tratamientos médicos
- Tipo de trabajo realizado anteriormente e historial dosimétrico si procede
- El historial dosimétrico de toda la vida profesional

- Los protocolos médicos se archivarán por los servicios médicos , al menos durante 30 años después del cese de las actividades del trabajador.

### **Recomendaciones de la ICRP con repercusión en la protección radiológica operacional**

En la protección Radiológica Operacional en Radiodiagnóstico, se deben observar las siguientes normas:

En función de la imagen que se pretenda obtener, los generadores de rayos X, deberán tener las características adecuadas, teniendo en cuenta la complejidad del paciente y las estructuras que deba atravesar el haz. Es importante utilizar el kilovoltaje pico adecuado y verificar que la filtración del haz sea suficiente.

El tamaño del campo de radiación será el mínimo compatible con la zona que se pretende visualizar.

Será importante considerar el correcto centrado del haz (y una correcta coincidencia entre el haz de radiación y el haz luminoso) así como una correcta alineación del tubo de rayos X con la rejilla antidifusora.

Es obvio también la necesidad de utilizar las hojas de refuerzo adecuadas y compatibles con el tipo de película, chasis y equipo que se está utilizando. Si es posible deberán utilizarse las combinaciones hojas intensificadoras-películas más rápidas compatibles con la información que se pretenda obtener.

Es importante medir periódicamente (al menos una vez al año) las dosis de entrada de los pacientes y compararlas con los valores de referencia y con posibles valores de controles previos. Esta normativa permitirá detectar fallos en el funcionamiento de los equipos y verificar si dichas dosis se mantienen inferiores a valores de referencia.

Si las dosis a la entrada resultan claramente superiores a los valores de referencia (o los obtenidos en controles previos) procede llevar a cabo un control de calidad del generador y dispositivos de la cadena de imagen, así como de los procedimientos y técnicas utilizadas en la exploración.

Deberá realizarse así mismo un control de las procesadoras y de las causas de las radiografías rechazadas y repetidas.

Toda esta normativa deberá incluirse en un programa de garantía de calidad implantado en el Servicio de Radiodiagnóstico.

El uso de distintos tipos de cartulinas de refuerzo y de películas y chasis dentro de un mismo servicio, puede suponer problemas si no existe una estricta disciplina en su utilización para evitar confusiones.

La experiencia en varios centros, indica que la sustitución de unas películas y/o chasis por otros de otro tipo (que generalmente suponen menos dosis para los pacientes: chasis de fibra de carbón, hojas intensificadoras de tierras raras, etc.) debe realizarse simultáneamente en todo el servicio o al menos en las salas que estén físicamente localizadas en una parte concreta del Hospital para evitar confusiones.

Es importante también, tener en cuenta que cuando se diseña el servicio, la ubicación de las salas de revelado y de otras dependencias de uso común, debe realizarse de forma que se considere la optimización de los trayectos que tiene que realizar el distinto personal del servicio a lo largo del día (y las dosis de radiación que en estos trayectos se puedan recibir).

Es fundamental también promocionar la adecuada recuperación y transmisión de la información, con objeto que los pacientes que lleguen al servicio puedan aportar sus informes radiológicos anteriores y los pacientes que sean explorados en el servicio puedan aportar posteriormente la referencia de los estudios radiológicos realizados.

Desde un punto de vista de protección al paciente, puede ser importante disponer la colocación de anuncios para que las mujeres que puedan estar embarazadas adviertan al personal de la sala, y que el personal médico de las respectivas salas, tenga una guía de las actuaciones o criterios a tener en cuenta frente a las posibles exploraciones radiológicas de estas pacientes.

## **Blindajes**

Las instalaciones de radiodiagnóstico deben estar dotadas de blindajes contra la radiación, para alcanzar una protección adecuada al paciente, personal de operación o incluso personal del público en general que puede permanecer en locales colindantes a la sala de rayos X. Se debe distinguir en primer lugar las llamadas barreras primarias y secundarias.

Son barreras primarias aquellas estructuras o materiales de blindaje (paredes, pantallas, biombos, etc.) sobre los que puede ir dirigido en alguna ocasión el haz directo, en condiciones normales de trabajo.

Son barreras secundarias aquellas que protegen de la radiación secundaria (dispersa y de fuga).

Para poder estimar el tipo y espesor del blindaje necesario en una Instalación de Radiodiagnóstico, será preciso conocer ciertos datos:

Del equipo instalado (rendimiento del tubo y tasa máxima de dosis que es capaz de producir a una determinada distancia)

De las condiciones de operación (kVp máximo utilizado, direcciones del haz primario, número semanal de estudios radiológicos)

De las dimensiones de la sala y tipo de habitáculos colindantes y uso al que se destinan.

**Normalmente se definen los siguientes parámetros:**

#### **Factor de carga**

relacionado con el grado de utilización del equipo, se suele expresar en mA.min/sem

#### **Factor de utilización**

factor que es igual a 1 para la radiación directa, cuando el haz se dirige en esa dirección permanentemente y en  $\frac{1}{4}$  las paredes que ocasionalmente actúen como barreras primarias.

#### **Factor de ocupación**

relacionado con el tiempo medio de ocupación del habitáculo que se pretende proteger; se suelen tomar valores de 1,  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{16}$  para espacio es permanentemente ocupados, pasillos, escaleras y ascensores, respectivamente.

El producto de los tres factores representan el dato básico para calcular el espesor requerido de blindaje, usualmente plomado.

Es importante tener en cuenta que aplicando el criterio de optimización de la Protección Radiológica, el coste de blindaje en las instalaciones de Radiodiagnóstico es pequeño comparado con las dosis que se evitan a las personas, por lo cual es una norma recomendable dimensionarlo siempre en exceso, buscando que la radiación que pueda llegar a zonas colindantes, sea como máximo del orden de 1 mSv/año.

La radiación dispersa depende mucho del tipo de dispersor y de la dirección de observación, pero para los rayos X, la dosis asociada es del orden de partes por mil respecto al haz primario.

Las discontinuidades en los blindajes (juntas, uniones, entradas de cables o conducciones, etc.) pueden producir incrementos significativos de dosis debido a la fuga de la radiación. Por ello, tiene especial importancia la formación de uniones imbricadas, de manera que no haya trayectorias en línea recta, a través de las uniones.

El acondicionamiento de un local como sala de rayos X debe ser supervisado por un experto en protección radiológica, quien establecerá las condiciones idóneas en función de parámetros tales como, carga de la sala, tipo y número máximo de exploraciones previstas, barreras móviles, etc.

Estimaciones de la protección que producen las mamparas, delantales, guantes, vidrios convencionales y plomados, gafas plomadas y protectores de pacientes.

En principio, estos medios de blindaje deben actuar como barreras secundarias aunque, si por inadvertencia la persona que los usa se sitúa en el haz directo, su eficacia es también muy grande.

Estos blindajes se caracterizan desde el punto de vista de su efecto atenuador, en espesor equivalente de plomo. Por ejemplo, un protector de tiroides equivalente a 0.5 mm de Pb, produce el mismo efecto de atenuación de la radiación que 0.5 mm de Pb alrededor del cuello del paciente.

La eficacia de estos elementos depende de la calidad del haz primario, es decir, de la tensión de operación y del espesor de la capa hemirreductora. Por ejemplo, aproximadamente un espesor de 0.25 mm de Pb reduce al 12% la exposición de un haz de 100 kVp. Cuando la tensión acelerada es del orden de 60 kVp, la reducción puede llegar al 98%.

Un centímetro de vidrio convencional (tipo planilux o parsal) tiene un factor de transmisión para rayos X de 90 kVp, filtrados con 2 mm de aluminio, de 0.175 (transmite el 17.5%). Con 2 cm, esta cifra se reduce el 7% y con 3 cm, al 3.5%. Para potenciales de aceleración menores, la atenuación será obviamente mayor.

Para 40 kVp, haces de rayos X filtrados con 2 mm de Al ó 1 cm de vidrio convencional, transmiten un 4% y con 1,5 cm., ésta cifra se reduce al 1,3%.

Con vidrio plomado (equivalente a 2mm de Pb), el factor de transmisión para 90 kVp, filtrados con 2 mm de Al, es inferior al 0.1%.



Los delantales, guantes o gafas plomadas, equivalentes a 0,25 y 0.50 mm de Pb, tienen factores de transmisión a 80 kVp del 4.3 y 1.5% respectivamente.

NO COPIAR

# PROTECCION RADIOLÓGICA ESPECIFICA EN RADIODIAGNÓSTICO

## Consideraciones generales

La Protección Radiológica en Radiodiagnóstico debe contemplarse específicamente tanto para el personal que opera los equipos, como para los miembros del público y para los pacientes.

El personal de operación deberá ser experto en la manipulación de sus equipos y conocedor de los riesgos potenciales que supone el manejo de estas fuentes de radiación. Como personal profesionalmente expuesto, tendrá límites de dosis más altos que los miembros del público, sin que ello signifique que no se deban aplicar siempre criterios de optimización para que las dosis que reciba este personal sean tan bajas como razonablemente sea posible (criterio ALARA).

Los miembros del público que se encuentren en las proximidades de las salas de rayos X (incluso los pacientes o sus familiares en salas de espera) no deben recibir radiación como resultado del funcionamiento de generadores de rayos X en las salas (no estaría justificado, al no tener en este caso ningún beneficio o cambio).

Para los pacientes no se establecen límites de dosis, si bien la normativa vigente obliga a que se optimice el uso de las radiaciones ionizantes en el diagnóstico (las dosis deben ser las mínimas razonablemente posible, para obtener un diagnóstico adecuado). Es obvio que el personal de operación debe conocer los métodos que permitan optimizar las exploraciones radiológicas.

En general, la correcta aplicación de criterios de optimización a los pacientes (por ejemplo, el uso de cortos tiempos en radioscopia), repercutirá en que las dosis al personal de operación sean también más bajas.

## Normativa general

La protección Radiológica en el Radiodiagnóstico debe plantearse como un equilibrio entre la Protección Radiológica incorporada al equipo, la incorporada al diseño de la propia Instalación y la Protección Radiológica operacional durante el funcionamiento del equipo.

Los equipos deben ser fabricados con unos criterios de calidad mínimos que aseguren la recepción de dosis razonablemente bajas para los pacientes o para el personal de operación (filtración adecuada, dispositivos automáticos de colimación si procede, cortinillas plomadas alrededor del intensificador, etc.).

Los equipos de rayos X deben ser ubicados en locales que hayan sido previamente estudiados y preparados para instalar el equipo previsto, teniendo en cuenta la carga de trabajo previsible.

Deberá tenerse en cuenta que los niveles de radiación en el exterior de la sala deberán ser prácticamente despreciables (según un buen criterio de optimización de la protección radiológica) en las zonas en las que puedan haber miembros del público o de otro tipo de personal profesionalmente expuesto. Las posibles posiciones de los operadores dentro de las salas, deben estar correctamente protegidas para que detrás de las barreras, las dosis sean lo más bajas posibles.

Deberán elaborarse normas para el correcto funcionamiento u operación de los equipos, tanto desde el punto de vista de la posición adecuada de los operadores mientras se está emitiendo radiación, como de los protocolos de las exploraciones para obtener la información diagnóstica que se precise, con la mínima dosis para los pacientes.

Es obvio que la protección radiológica, debe ser considerada por el profesional médico, también en la etapa previa, cuando se solicita una exploración radiológica evaluando su relación coste-beneficio.

### **Protección Radiológica referida a equipos**

Es fundamental que se definan para cada equipo, las condiciones correctas de funcionamiento y las películas, chasis u hojas intensificadoras en uso, en relación con tablas de datos técnicos a utilizar en función de los tipos de exploración prevista y de la complejidad del paciente (kilovoltios en pico, miliamperios, tiempo, etc.).

En equipos con colimación automática, deben utilizarse el tamaño de chasis y película más pequeños compatibles con la imagen que se pretende obtener. De no ser así, el paciente recibiría radiación sobre un volumen y una superficie transversal mayores de los requeridos en el estudio. En estas condiciones aumentaría el nivel de la radiación difusa, lo cual ocasionaría un empeoramiento de la calidad de la imagen y un aumento de la dosis que recibe el personal de operación.

En equipos con colimación manual debe asegurarse reducir el campo de radiación al tamaño más pequeño compatible con la imagen que se pretende obtener, incluso en radioscopia ( el equipo debe permitir reducir el campo de radiación tanto en radioscopia como en radiografía).

Es obvio que en el diseño de los equipos debe contemplarse la utilización de tableros en las mesas que tengan la mínima absorción de

radiación posible, ya que así se reducirá la dosis al paciente, consideración que se puede aplicar asimismo a los chasis que contengan las películas y las hojas intensificadoras.

Si el tubo de rayos X está sobre la mesa, deben existir cortinillas y/o una mampara articulada suspendida, para proteger al personal de operación.

Los equipos deben tener en el cuadro de mandos una señalización (por ejemplo un piloto rojo), que indique cuando se emite radiación.

Si existe un generador compartido por equipos de rayos X dispuestos en salas distintas, debe verificarse que el selector del tubo o sala que va a funcionar, está correctamente posicionado, antes de cada disparo.

Cuando existan varios tubos en una misma sala no deberá haber más de un paciente durante la realización de la exploración radiológica y deberán utilizarse siempre que sea posible protectores gonadales para reducir la dosis genéticamente significativa.

### **Protección Radiológica en el diseño y construcción de la instalación**

El diseño y construcción de una instalación con fines de diagnóstico médico, ha de ir orientado a:

Proteger a las personas de modo que las dosis de radiación que puedan recibir el personal profesionalmente expuesto, los pacientes y los miembros del público sean tan pequeñas como sean razonablemente posibles.

La conservación del material radiográfico en perfecto estado, el aumento de velo de dicho material puede requerir repeticiones innecesarias de placas o pérdida de calidad de la imagen.

Evitar la interferencia con otros equipos cuyo correcto funcionamiento sea susceptible de ser perturbado por la radiación.

Optimizar la calidad de las imágenes con el mínimo de radiación.

**Para que estos objetivos puedan alcanzarse, en el diseño y construcción de la instalación han de observarse las siguientes medidas:**

- El acceso a las salas deberá ser controlado

- Las puertas de acceso deberán permanecer cerradas cuando haya emisión de rayos X
- Las salas de Radiodiagnóstico no serán lugares de paso para acceder a otras dependencias.
- Los pupitres de control de los equipos de rayos X han de estar protegidos mediante mamparas blindadas, a ser posible fijas o estructurales.
- Las mamparas blindadas que protegen las zonas de los pupitres de control han de disponer de visores que permitan la observación del paciente.

**Los soportes portachasis, de cualquier tipo, para efectuar radiografías no se colocarán en:**

- Zonas de puesto de control
- Muros de las salas de revelado o cámaras oscuras o lugares de almacenamiento de películas, a menos que el blindaje y los tiempos de almacenamiento sean tales que el velo (densidad óptica) de las mismas no pueda aumentar por este motivo, en más de 0.05
- La inmediata proximidad de las puertas y de manera que el haz directo pueda dirigirse hacia las mismas.
- El diseño de la sala será realizado de forma que no se dirija el haz directo de radiación hacia las mamparas que protegen el pupitre de control, puertas de acceso, puertas de vestidores, ventanas, cuartos de preparación de material incluidos en la sala, u otras ocupaciones por el personal auxiliar o personal de operación. Análogamente se aconseja no dirigirlos hacia la cámara oscura, a no ser que las barreras hayan sido diseñadas especialmente.
- No funcionarán dos tubos de rayos X en la misma sala alimentados por distintos generadores, a no ser que exista una barrera de protección entre ellos. (Se exceptúan las instalaciones con funcionamiento simultáneo o alterno en dos proyecciones sobre el mismo paciente.
- Cuando existan dos o más tubos alimentados por el mismo generador, ubicados en la misma sala, no se preparará a un nuevo paciente, cuando uno de ellos esté siendo explorado.

- Las áreas de Radiodiagnóstico deberían estar debidamente señalizadas, recomendándose asimismo la colocación de indicadores luminosos en lugares visibles de los accesos de las salas de Radiodiagnóstico, que adviertan de la emisión de rayos.
- La planificación y diseño de la instalación han de efectuarse teniéndose en cuenta consideraciones futuras (carga de trabajo, futuras aplicaciones, etc.). Así mismo han de tomarse en consideración no sólo los límites de dosis actuales, sino que es imprescindible considerar en todos los casos, el criterio ALARA.

### **Protección radiológica relativa al funcionamiento de la sala**

Las técnicas radiológicas habituales para cada proyección con un equipo dado (tanto manual como automático) y con el dispositivo de imagen deben constar por escrito y deben estar siempre disponibles en las salas, en la zona de la consola de mandos, a efectos que todo el personal de operación (suplentes, de turnos de noche o que se incorporen al servicio de la sala tras un período de trabajo de otras salas o realizando exploraciones diferentes) pueda utilizar directamente la técnica adecuada, sin necesidad de tanteos y repeticiones.

Deben existir normas básicas escritas de Protección Radiológica para las diferentes salas de radiología y estar accesibles al personal de operación.

Puede ser conveniente también disponer de normas escritas elementales para los operadores, referentes a la no permanencia dentro de la sala durante el disparo (observar al paciente desde el pupitre de control), no sujetar al paciente con las manos, emplear dispositivos de sujeción e inmovilización, conveniencia de utilizar delantales plomados de espesor mínimo equivalente a 0.25 mm de plomo, cuando el tipo de operación a realizar haga indispensable la permanencia del personal de operación dentro de la sala y fuera de la mampara de protección, la utilización de guantes, gafas, delantales plomados y mamparas protectoras suspendidas del techo en salas de radiología intervencionista, quirófanos de traumatología, etc.) y utilización de protectores plomados para pacientes siempre que sea posible (cuando no interfieran en la imagen que se pretende obtener).

La decisión de efectuar una exploración radiológica, debe hacerse en un análisis diferencial coste-beneficio, con el fin de asegurar que el conjunto de perjuicios resultantes de la exploración queda claramente compensado por los beneficios derivados de la misma. Conviene eliminar todas las exploraciones innecesarias y reducir al máximo las de mayor riesgo (siempre bajo la responsabilidad y según el criterio del director de la instalación).

Es realmente importante que exista una comunicación eficaz entre el radiólogo y el médico prescriptor, para valorar el cuadro clínico del paciente, a fin de adoptar la estrategia más adecuada, para aceptar el protocolo de operación propuesto, establecer ciertas modificaciones o descartar la exploración radiológica.

Es fundamental promocionar la adecuada recuperación y transmisión de la información radiológica, con objeto que los pacientes que acudan por primera vez al servicio puedan aportar posibles informes radiológicos anteriores y que los pacientes que sean explorados en el servicio puedan aportar posteriormente la referencia de los estudios radiológicos realizados.

Antes de iniciar una exploración es muy importante disponer (caso de existir) de estudios similares previos dentro y fuera de la institución, con objeto de minimizar el número de exploraciones radiológicas a que sea sometido el paciente.

El mantenimiento de un archivo de radiografías es imperativo por necesidades legales de manera que se atribuye un plazo mínimo de conservación de documentos radiográficos de 5 años.

Este plazo de 5 años se está respetando gracias a la posibilidad de microfilmear las radiografías, ante el inmenso volumen que llegan a tener los archivos de documentos radiológicos. En todo caso se hace necesario a petición de un paciente determinado, disponer (para respetar este plazo de 5 años y conciliarlo con las necesidades legales) de una copiadora de radiografías, que existan ya en la mayoría de los centros.

## **Protección radiológica relativa al paciente**

### **La filtración del tubo**

Una filtración adecuada (mínimo 2.5 mm de Al, en radiología general) limita de modo importante las dosis al paciente de rayos X de baja energía que se absorben en el paciente sin contribuir a la obtención de la imagen radiológica.

En tubos que dispongan de filtros extraíbles, es importante verificar su correcta colocación tras retirarlos para alguna reparación o por algún motivo especial.

En tubos en los que los filtros no son accesibles ni visibles desde el exterior, es conveniente verificar, al menos una vez en la vida del tubo, que éste posea la filtración adecuada, exigiendo, tras cada reparación en la que se desmonte la carcasa, una certificación que garantice que todos los filtros se encuentran correctamente montados.

En mamografía se usan kilovoltajes muy bajos y por ello varían los requerimientos de filtración. Para tubos de ánodo de molibdeno, se recomiendan filtros del mismo material, con un espesor de 0.03 mm

### **Selección del tiempo de exposición**

Debe seleccionarse el tiempo más corto de disparo posible, sobre todo si se explora un paciente no colaborador y con tiempos cortos disminuirá la penumbra cinética. En este sentido, se recomienda realizar las exploraciones pediátricas con generadores (trifásicos o multipulso, normalmente capaces de conseguir tiempos muy cortos en los disparos) para evitar repeticiones por imágenes deficientes.

### **La colimación del haz**

La colimación del haz de rayos X, ya sea automática o manual condiciona el tamaño del campo de radiación que siempre ha de ser el mismo compatible con la imagen que se pretende visualizar.

Es muy importante, así mismo, considerar el correcto centraje del haz y una correcta coincidencia entre el haz de radiación y el haz luminoso, así como una correcta alineación del tubo de rayos X con la rejilla antidifusora.

La utilización de un campo superior a las dimensiones de la placa, significa aumentar la dosis al paciente y consecuentemente al personal de operación y obtener una imagen radiológica, deficitaria en muchas ocasiones de ciertos detalles diagnósticos de interés.

Un desalineamiento o falta de coincidencia entre el haz de luz y el haz de radiación puede acarrear:

Que se deban repetir disparos por quedar cortada la imagen

Que se irradien zonas periféricas a las de interés (sobre todo órganos críticos que están muy próximos al borde del campo), lo cual tiene repercusiones más graves en caso de radiología pediátrica.

### **Las pantallas de refuerzo**

Se deben utilizar la combinación chasis-hoja intensificadora-película más rápida posible compatible con la calidad deseada de imagen, para asegurar la mínima dosis al paciente.



Sin embargo y debido al riesgo de errores, no conviene utilizar en una sala combinaciones de diferentes sensibilidades, salvo si cada combinación tiene un formato de película distinto y la selección de técnica radiográfica es manual (o sea, no se trabaja con expositómetro automático). Por tanto, una sala debe equiparse con la combinación chasis-hoja intensificadora-película adecuada más rápida que permitan las exploraciones que en ella se practiquen.

Los conjuntos placa-pantalla de refuerzo convencionales poseen menor sensibilidad que las rápidas (requieren por tanto una mayor exposición) y tienen una capa fluorescente más delgada, lo que implica que produzcan menor dispersión de luz y por tanto una mayor nitidez en las imágenes.

Los conjuntos placa-pantalla de refuerzo de tierras raras poseen una mayor sensibilidad (requieren menor exposición), tienen también una capa fluorescente delgada, lo que implica dispersión de luz mínima y por tanto producen imágenes de gran nitidez. El aumento de la sensibilidad sin aumentar el espesor se consigue con sustancias fluorescentes compuestas por tierras raras, que poseen un coeficiente de absorción fotoeléctrico elevado y un mayor rendimiento de conversión en luz.

### **La protección directa al paciente**

Siempre que no se intercepte la imagen diagnóstica necesaria, se deben utilizar los medios de protección radiológica para minimizar las dosis recibidas por el paciente, especialmente en la pediatría u obstetricia. Los más importantes son:

- Uso de protectores gonadales
- Protección de embarazadas
- Importancia de la posición del paciente para evitar la exposición al haz primario de los órganos más radiosensibles.

## **ASPECTOS PARTICULARES DE PROTECCIÓN DEL PACIENTE Y DEL PERSONAL DE OPERACIÓN EN UNIDADES DE RADIODIAGNÓSTICO GENERAL.**

### **Normas básicas de protección en unidades de radiografía básica**

En unidades de Radiodiagnóstico de radiografía básica, se debe observar la siguiente normativa:

- **a.-** El tamaño del campo de radiación será el mínimo compatible con la zona anatómica de estudio: sus dimensiones se varían con el limitador de campo que define una zona rectangular de lados variables. La amplitud del campo de radiación puede ser observada con el visor luminoso que proyecta sobre el paciente un rectángulo iluminado que debe coincidir con la zona irradiada por el haz de rayos X.
- **b.-** La consola de mando del tubo de rayos X debe presentar en forma de indicadores luminosos, los datos técnicos de la radiografía (kilovoltaje, miliamperaje, tiempo de disparo). Tal formación debe ser presentada incluso cuando el sistema esté dotado de selección automática de parámetros.
- **c.-** Es fundamental que se definan para cada equipo las condiciones concretas de funcionamiento con las películas chasis u hojas intensificadoras que se estén utilizando, y se expresen en forma de tabla de datos técnicos para ser utilizadas en función de los tipos de exploración a realizar y del espesor o complejidad del paciente. (kilovoltios pico, miliamperios, tiempo).

Sin embargo, conviene actualizar periódicamente dichos parámetros mediante radiografías de control a fin de compensar variaciones posibles en la cadena de imagen, bien en el tubo (aumento de la filtración intrínseca o el efecto anódico) o en material accesorio (tipo de película, chasis, hojas de refuerzo, etc.). Esta comprobación debe realizarse con periodicidad anual, para comprobar si se mantienen los parámetros operativos, rectificando los datos que proceda.

- **d.-** En el diseño de los equipos debe contemplarse la utilización en las mesas de tableros que tengan atenuación mínima de radiación, así se reducirá la dosis al paciente. Esta consideración es igualmente aplicable a los chasis que contengan las películas y a las hojas intensificadoras.
- **e.-** El tubo de rayos X solo ofrece riesgo de exposición en el instante del disparo. Tal circunstancia debe ser indicada por un piloto rojo en la consola de mandos, que permanece encendido durante el tiempo de generación de rayos X. Es igualmente conveniente un segundo piloto rojo colocado sobre la parte superior de la puerta de acceso a la sala, que advierta al encenderse la prohibición de acceso al recinto.
- **f.-** En cada exploración radiológica deberán utilizarse solo las proyecciones imprescindibles y las más adecuadas para dar máxima información con dosis al paciente lo más bajas razonablemente

posibles (por ejemplo en radiografías de cráneo, se protege mejor el cristalino con proyección posteroanterior).

- **g.-** La distancia foco-piel en las radiografías debe ser la adecuada en cada estudio pero nunca inferior a 45 cm, en caso contrario recibiría el paciente una dosis excesiva.
- **h.-** Deberá verificarse periódicamente que existe un buen contacto entre películas y cartulinas de refuerzo: estas últimas deberán conservarse protegidas frente a daños mecánicos y permanecer suficientemente limpias.
- **i.-** No deberá haber más de un paciente en la sala radiológica durante la exploración a de evitar la recepción de dosis de radiación totalmente injustificadas.
- **j.-** El operador de un tubo de Radiodiagnóstico debe seguir una serie de reglas elementales que redundan en una reducción muy significativa de la dosis acumulada. Las normas más importantes son:

**1.-** El operador no permanecerá en la sala en el momento del disparo del tubo a no ser una presencia absolutamente necesaria, en cuyo caso deberán usar delantales plomados.

**2.-** Siempre que las características propias de una exploración hagan necesario la inmovilización del paciente, ésta se realizará mediante la utilización de sujeciones mecánicas apropiadas. Si esto no fuera posible, y la inmovilización se realizara por una o varias personas, éstas serán a juicio del facultativo personal profesionalmente expuesto en turnos rotativos. En ningún caso se encontrarán entre ellas mujeres gestantes o menores de 18 años. Todas las personas que intervengan en la inmovilización serán siempre el menor número posible, y deberán ir provistos de guante y delantal plomado, para lo cual estas prendas de protección deberán estar disponibles en la instalación en número suficiente para permitir su uso simultáneo.

### **Normas básicas de protección en unidades de radiología general con radioscopia**

La normativa básica a seguir en estas instalaciones se resume en las siguientes reglas:

- **a.-** Los equipos de radioscopia estarán provistos de dos tipos de blindajes, uno destinado a la atenuación del haz residual, dispuesto detrás del sistema de imagen y otro a su alrededor para atenuar la radiación dispersa (cortinillas plomadas y marco plomado alrededor de la pantalla).
- **b.-** Los equipos de radioscopia deberán tener interruptor tipo “hombre muerto” (pedales con muelle de recuperación que interrumpan el disparo del tubo al retirar el pie), así como temporizadores y avisadores acústicos, que actúen interrumpiendo la emisión de rayos X al finalizar un tiempo máximo de 10 minutos.
- **c.-** En radioscopia la distancia foco-piel será como mínimo de 30 cm, pues a distancias más cortas el paciente recibirá una dosis intolerablemente alta.
- **d.-** La radioscopia requiere gran pericia y entrenamiento en la reducción de tiempo de exposición realizando la llamada operación discontinua, pulsando el interruptor y observando rápidamente emitiendo así radiación durante el menor tiempo posible.
- **e.-** En algunas técnicas radiográficas se utiliza la radioscopia como guía para centrar la imagen en la radiografía. Tal actuación no es radiológicamente correcta porque incrementa innecesariamente la dosis al paciente.

### **Normas básicas de protección en unidades de radiología especial**

En este tipo de instalaciones existe un riesgo significativo que tanto el personal de operación como los propios pacientes puedan recibir dosis más elevadas que en otras instalaciones de Radiodiagnóstico. Sin embargo, tomando las precauciones adecuadas y aplicando unas normas básicas, las dosis recibidas por el personal de operación no deben rebasar los límites anuales.

#### **Las reglas más importantes son:**

- **a.-** En salas de radiología especial (radiología intervencionista, hemodinámica, angiografía, cateterismo, etc.) se requieren controles radioscopicos cuya duración será del orden de horas. La exploración se realiza en tales condiciones, que el radiólogo y el personal auxiliar se encuentra cerca del paciente y necesitan a menudo introducir sus manos en el haz directo. En equipos de arco el tubo queda a la altura del hombro o cabeza de los operadores, en tales casos el cristalino puede recibir dosis elevadas de radiación dispersa.

Tales exposiciones están justificadas por ser de beneficio muy alto frente al riesgo.

- **b.-** Dada la radiosensibilidad de cristalino y gónadas, resulta altamente conveniente utilizar protectores gonadales en estudios de angiografía abdominal y de cristalino, en angiografía cerebral, siempre que ello sea posible.
- **c.-** En radiología vascular central o periférica, para seguir el trayecto al inyectar el medio de contraste, la dosis recibida por el personal puede ser elevada, lo que recomienda que persona que se encuentre a menos de 2 metros de la mesa de exploración debe estar convenientemente protegida por delantales, guantes y gafas plomadas.

Conviene indicar que existen guantes equivalentes a 0.03 mm de plomo que permiten el tacto quirúrgico. Estos medios de protección no siempre se pueden usar por lo cual la sala deberá estar dotada de mamparas abatibles suspendidas del techo para proteger convenientemente al personal de operación en todos los casos posibles.

En los equipos de arco, en quirófanos, donde la duración de las exploraciones puede ser muy larga (quirófanos de traumatología), las exposiciones directas en las manos de los operadores pueden ser muy prolongadas, en tales casos es imprescindible la utilización de guantes plomados.

### **Normas básicas de protección al paciente en mamografía**

En estos equipos, el control de calidad resulta especialmente crítico, pues en las exploraciones se irradia a una población mayoritariamente sana. En tales casos se eleva mucho la relación coste/beneficio y por consiguiente deben usarse razonablemente alcanzables. Debe preverse un control de calidad de periodicidad anual.

En mamografía se utilizan haces de radiación de energía muy baja. El dispositivo utilizado consta de una placa con soporte recubierto por emulsión en una sola cara sobre la cual se sitúa la pantalla de y sobre ésta, la rejilla antidifusora. Por su cara inferior el soporte descansa en el fondo del chasis, que es de un material plomado.

La cantidad de radiación que atraviesa la mama no es muy importante lo que hace bajo el riesgo de la paciente, y hace normalmente innecesario utilizar protecciones específicas. Es importante realizar el estudio en condiciones de adecuada comprensión de la mama, para

minimizar la radiación dispersa, alcanzándose en estas condiciones una mejor calidad de imagen lo que redundaría en mejor capacidad de diagnóstico.

La dosis principal recibida corresponde a dosis piel en la cara de entrada de la radiación. La norma de las CC.EE CD/173/90 recomienda una dosis máxima a la entrada de 7 mGy con una comprensión a un máximo de 4.5 cm., suponiendo que se usa una rejilla antidifusora. En distancias foco-piel grandes, del orden de 65 cm, la dosis puede ser muy inferior sobre todo sin rejilla antidifusora, que es recomendable para espesores de 5 cm; para valores inferiores se recomienda trabajar sin rejilla antidifusora.

### **Normas básicas de protección utilizando unidades móviles**

Los equipos móviles pueden sufrir desajustes mecánicos debido a la necesidad de su desplazamiento a distintos lugares y a sus condiciones no siempre favorables. Por ejemplo, algunos equipos móviles van provistos de baterías de doble función: alimentación del tubo de rayos X, y del motor de propulsión del transporte del sistema. El consumo elevado del motor motiva con cierta frecuencia que, la carga de las baterías descienda niveles bajos que puedan causar degradación apreciable en la calidad de las imágenes. Se requiere por tanto, una comprobación sistemática para garantizar en todo momento la carga correcta de las baterías.

Los desajustes mecánicos más frecuentes y con mayor incidencia en la calidad de las imágenes son los desalineamientos entre el soporte de la imagen y el tubo de rayos X. Se debe pues comprobar la estabilidad de alineamiento con periodicidad adecuada al grado de utilización del sistema.

Existen situaciones en el uso de rayos X de equipo móvil en las que el suministro eléctrico local es de potencia insuficiente, lo que se traduce en funcionamiento defectuoso, en especial en la mala calidad de las radiografías. La solución de este problema es el uso de equipos alimentados en baterías recargables.

Es muy importante tener en cuenta en equipos móviles de rayos X, que habitualmente no existen blindajes estructurales en los lugares de utilización, y por esta razón el operador deberá cerciorarse en los instantes de disparo del tubo, de que no existan otros pacientes o personal de operación sobre los que pueda incidir el haz directo.

### **Normas básicas de protección radiológica en radiología pediátrica**

La protección radiológica es en estos casos especialmente crítica por la mayor esperanza de vida de los pacientes. Por tal razón debe en cada caso realizarse un balance riesgo/beneficio a fin de eliminar exploraciones

radiológicas de bajo rendimiento, utilizando otras técnicas alternativas que no supongan exposición a la radiación.

El radiólogo pediátrico conoce que en muchas ocasiones resulta difícil llegar a una cooperación adecuada del paciente, pues por ejemplo no es fácil que el niño permanezca inmóvil o contenga la respiración durante un determinado tiempo. Esta situación da lugar a radiografías móviles o mal centradas.

En radiología pediátrica es de suma importancia la colimación correcta, adaptando estrictamente el campo de radiación al área explorada, pero sin comprometer su extensión. En estos casos hay que poner especial atención a los parámetros y condiciones de realización de la radiografía para reducir a un mínimo absoluto el riesgo de repeticiones.

En este campo de la radiología es conveniente, y en un gran número de casos necesario, desde el punto de vista costo/beneficio utilizar sistemas que faciliten tiempos cortos de exposición tales como hojas reforzadoras de tierras raras, películas adaptadas a estas hojas, o sistemas modernos con intensificador de imagen. Por ello es importante utilizar generadores con los que sea posible alcanzar tiempos de exposición muy cortos. En general esta condición se alcanza con generadores trifásicos o multipulso.

El uso de exposímetro automático en radiología pediátrica es altamente recomendable para reducir los errores de exposición. Tal procedimiento exige que el exposímetro esté bien calibrado pues caso contrario se requeriría la repetición de placas, situación intolerable dada la elevada radiosensibilidad de los pacientes.

En radiología pediátrica es necesario utilizar accesorios de protección, en gónadas, y en exploraciones en cráneo utilizar proyecciones posteroanteriores siempre que sea posible, así como protecciones para el cristalino.

Finalmente el radiólogo pediátrico deberá contemplar siempre la posibilidad de embarazo no declarado en pacientes puberales, a fin de adoptar las medidas más pertinentes.

# **GARANTÍA DE CALIDAD EN INSTALACIONES DE RADIODIAGNÓSTICO**

## **ASPECTOS GENERALES**

En un proceso de fabricación o trabajo se define la garantía de calidad como la serie de normas en todos los escalones del proceso, para que éste se realice de acuerdo con todas las pautas previstas.

El control de calidad estudia una serie de objetivos definidos en forma de protocolos que permiten verificar que los parámetros característicos del proceso están controlados y no se mueven fuera de unas bandas de tolerancia.

Un programa de garantía de calidad (QA) se puede definir, según la Organización Mundial de la Salud, como un esfuerzo organizado por parte del personal de una instalación para conseguir con seguridad que las imágenes diagnósticas obtenidas en dicha instalación tengan una calidad suficiente para que conduzcan en todos los casos a una información diagnóstica adecuada, al menor costo posible y con la mínima exposición del paciente a las radiaciones. Esta última condición también debe aplicarse a los trabajadores.

### **Las fases de un programa de garantía de calidad en radiodiagnóstico**

En su concepción más amplia posible, un programa de garantía de calidad debe definir las normas de las siguientes fases del proceso del Radiodiagnóstico

- a.-** Solicitud de las exploraciones
- b.-** Realización de las mismas
- c.-** Interpretación de la información obtenida
- d.-** Transmisión de esta información al médico solicitante

**Para abordar la segunda fase, quizás la de mayor dificultad, se deben considerar los siguientes aspectos:**

- 1°.-** Establecer una estructura orgánica adecuada
- 2°.-** Establecer una adecuada colaboración entre los radiólogos del servicio y los responsables de protección radiológica
- 3.-** Establecer planes de formación
- 4°.-** Realizar una selección adecuada de los equipos



5º.- Vigilancia de los equipos

6º.- Efectuar el mantenimiento previsto por el fabricante

7º.- Realizar los controles oportunos para garantizar la protección radiológica del personal de operación y de los pacientes

8º.- Realizar los controles oportunos para garantizar la calidad de las imágenes

9º.- Efectuar un análisis periódico de los parámetros que tienen más repercusión en los costes

**Métodos operativos de un programa de control de calidad.- Con relación a los métodos operativos, deben contemplarse las siguientes actuaciones:**

- Análisis de protocolos de exploración
- Análisis de exploraciones repetidas (total o parcialmente)
- Análisis de placas desechadas
- Análisis de dosimetría personal y de área
- Análisis de dosis a los pacientes
- Análisis del número y tipo de exploraciones en función de los parámetros asistenciales
- Análisis de costos

Elaboración de protocolos sobre los parámetros comprobar en equipos radiográficos, en equipos de registro y procesado de imágenes, en equipos fluoroscópicos, y de mamografía, en tomografía convencional y computarizada, en cineradiografía, en equipos fluorográficos y en radiología digital.

Los programas deben ir precedidos por un análisis previo de dosis a los pacientes y comparación de los valores obtenidos con otros de referencia nacionales e internacionales, con objeto de obtener la información necesaria que permita asignar prioridades de actuación para las acciones correctoras. Una vez que los programas estén implantados, los controles dosimétricos, aunque periódicos pueden ser menos exhaustivos.

NO COPIAR

# LEGISLACIÓN Y REGLAMENTACIÓN

## Legislación española sobre radiodiagnóstico

Toda actividad que implique manipulación de radiaciones ionizantes debe ser estrictamente regulada, además de vigilar la seguridad de los propios trabajadores, deben defenderse los intereses de terceros no implicados en estos procesos. El Radiodiagnóstico es un ejemplo de actividad en la que el uso de rayos X de vital importancia en diagnóstico viene acompañado por la peligrosidad que implica la recepción de esta radiación en el organismo.

En general en todos los países del mundo, existe una jerarquización legislativa que ha venido representándose mediante una pirámide de valores, como representamos en la figura adjunta

### **Leyes fundamentales. Reglamentos (Decretos) Ordenes ministeriales y Normas**

En la cúspide se sitúa la Ley Básica o Fundamental; el escalón siguiente está ocupado por los Reglamentos que desarrollan la Ley; a continuación las Ordenes Ministeriales que desarrollan los Reglamentos y como base de la pirámide las Normas específicas correspondientes

Actualmente en todos los aspectos relacionados con la utilización de rayos X y Protección Radiológica en Radiodiagnóstico, la pirámide legislativa española incluye dos leyes básicas, la más reciente de las cuales deroga parte de la primera, tres decretos y una resolución que desarrolla la Ley primitiva, una orden y dos Guías del Consejo de Seguridad Nuclear cuyo objetivo es desarrollar la normativa vigente.

Se describirán las ideas más importantes que deben conocer el personal profesionalmente expuesto a la radiación en Instalaciones de Radiodiagnóstico, sobre cada una de las Leyes y Reglamentos de que consta la pirámide legislativa española, así como una breve síntesis de la legislación comunitaria europea aplicable a la legislación española.

Parte de la pirámide legislativa está cubierta por la normativa recomendada por los organismos internacionales y las reconocidas internacionalmente. La pirámide legislativa española se representa esquemáticamente en la figura adjunta, en donde se enumeran las dos Leyes Básicas, los Decretos, Ordenes y Guías correspondientes.

## **LEY 15/80**

# DE CREACIÓN DEL CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

B.O.E. N° 100 DE 25/4/80

---

## LEY 25/1964 SOBRE ENERGÍA NUCLEAR (B.O.E. N° 107 DE 4/5/64)

---

- Real Decreto 1132/1990 sobre medidas fundamentales de Protección Radiológica de personas sometidas a exámenes y tratamientos médicos (N.O.E. n° 224 de 18/9/90)
  - Real Decreto 1891/1991 sobre Instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de Diagnóstico Médico (B.O.E. 3 de 3/1/92)
  - Real Decreto 53/1992. Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (B.O.E. n° 37 de 12/2/92)
  - Resolución del Consejo de Seguridad Nuclear sobre normas a que habrán de sujetarse la homologación de Cursos o Programas que habiliten para la dirección y operación de Instalaciones de rayos X para fines de diagnóstico y la acreditación directa del personal que ejerza dichas funciones (B.O.E. 274 de 14/11/92)
- 

Orden 18/10/89 por la que se suprimen las exploraciones radiológicas sistemáticas en los exámenes de salud de carácter preventivo (B.O.E. de 18/10/89)

---

Consejo de Seguridad Nuclear, Guía de Seguridad n° 5.7 (1988) Documentación técnica para solicitar autorización de Puesta en marcha para instalaciones de rayos X para Radiodiagnóstico)

Consejo de Seguridad Nuclear, Guía de Seguridad n° 5.11 (1990): Aspectos técnicos de Seguridad y Protección Radiológica en Instalaciones Médicas de rayos X para Radiodiagnóstico

Ley 25/1964 sobre energía nuclear

La Ley 25/1964 sobre Energía Nuclear constituye el primer instrumento que recoge los principios fundamentales sobre energía nuclear y protección contra el peligro de las radiaciones ionizantes y los desarrolla y amplía para contribuir el fomento de sus aplicaciones pacíficas. La Ley está estructurada en quince capítulos.

El objeto está claramente definido en su artículo primero, según las siguientes directrices:

- **a.-** Fomentar el desarrollo de las aplicaciones pacíficas de la Energía Nuclear en España y regular su puesta en práctica dentro del territorio nacional.
- **b.-** Proteger vidas, salud y haciendas contra los peligros de la energía nuclear y de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.
- **c.-** Regular la aplicación en el territorio nacional de los compromisos internacionales suscritos y ratificados por España sobre Energía Nuclear y Radiaciones Ionizantes.

### **Ley 15/1980 sobre creación del Consejo de Seguridad Nuclear (C.S.N.)**

La Ley 15/80 de creación del Consejo de Seguridad Nuclear se publicó en el Boletín Oficial del Estado nº 100 el día 25 de Abril de 1.980.

Las innovaciones o modificaciones más significativas que esta Ley introduce respecto a la Ley sobre Energía Nuclear son:

- Se segregan de la Junta de Energía Nuclear (hoy CIEMAT) misiones que tenía encomendadas en relación con la Seguridad Nuclear, como Organismo Técnico Asesor, con carácter preceptivo del Ministerio de Industria (hoy Ministerio de Industria, Comercio y Turismo).
- Las misiones segregadas se encomiendan a un nuevo ente, el Consejo de Seguridad Nuclear, independiente de la Administración General del Estado, que informará con carácter preceptivo al Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, teniendo sus decisiones técnicas carácter vinculante, incluida la denegación. El CSN tiene la facultad de suspender actividades de instalaciones por razones de seguridad, así como proponer la anulación de licencias.
- El Consejo de Seguridad Nuclear está constituido por un Presidente y cuatro Consejeros (asistidos por un Secretario General) del que depende un cuerpo técnico de funcionarios.

- Se crea una tasa de servicios, en compensación por la realización de las funciones asignadas, tasa que se adscribe a la hacienda del CSN.
- El CSN se regirá por un estatuto propio, pudiendo delegar algunas de sus funciones en las Comunidades Autónomas.
- El CSN deberá informar semestralmente al Congreso y al Senado.

## **Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (Real Decreto 53/92).**

### **Justificación y objetivos**

El desarrollo alcanzado por la utilización de radiaciones ionizantes ha hecho imprescindible contar con normas que basándose en las dictadas por los Organismo Internacionales competentes, hagan posible la Reglamentación de la Protección Radiológica, al establecer los criterios objetivos en que ésta debe basarse y al mismo tiempo, determinar los Organos del Estado competentes para la puesta en práctica de sus preceptos y que actualmente son: *el Consejo de Seguridad Nuclear y los Ministerios de Industria, Comercio y Turismo y el de Sanidad y Consumo, sin perjuicio de la competencia de otros Ministerios y autoridades.*

Entre las normas generales se indica que el número de personas expuestas a las radiaciones ionizantes será el menor posible, teniendo en cuenta factores sociales y económicos y que las dosis sean inferiores a los límites que se establecen en el Reglamento.

Los temas de este Reglamento aplicables al Radiodiagnóstico, han sido desarrollados en las Areas 10 y 11.

## **Rreal Decreto 1891/1991 sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico.**

### **Generalidades**

Este Decreto tiene por objeto regular la utilización de equipos e instalaciones de rayos X en diagnóstico médico, tanto humano como animal. Los equipos a que se refiere esta legislación son tanto los fijos, utilizados con carácter estacionario en locales y vehículos, como los móviles, susceptibles de ser desplazados a los lugares donde se requiera su empleo, en ambos casos los equipos deben corresponder con carácter preceptivo a modelos homologados.

El titular de una Instalación de Radiodiagnóstico es la persona natural o jurídica que explota la instalación y será responsable del

cumplimiento de las especificaciones técnicas contenidas en este Decreto, así como de las disposiciones contenidas en el Reglamento de Protección Sanitaria contra las radiaciones ionizantes.

### **Empresas de venta y asistencia técnica**

La venta y asistencia técnica de equipos de rayos X con fines de diagnóstico médico, deberá ser realizado por empresas o entidades autorizadas al efecto.

Las citadas empresas para su procedimiento de autorización, deberán indicar entre otros aspectos el procedimiento previsto para garantizar la protección radiológica de sus trabajadores expuestos, en razón de las tareas que deban desarrollarse.

La Dirección General de la Energía creará un Registro de Venta y Asistencia Técnica de equipos de Radiodiagnóstico, donde las empresas citadas deberán inscribirse. Estas empresas estarán obligadas a mantener los condicionamientos con que fueron autorizadas, y registrarán cuantas operaciones realicen; además deberán concertar una póliza de seguro de responsabilidad civil, cuya cuantía dependerá del tipo de actuaciones.

### **Procedimiento para la declaración**

La puesta en funcionamiento de instalaciones de Radiodiagnóstico deberá ser declarada por sus titulares ante la Dirección Provincial del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, en cuya demarcación se encuentre ubicada la Instalación. Para ello deberán presentarse los siguientes documentos:

- Declaración sobre las previsiones desuso de la instalación y sus condiciones de funcionamiento
- Certificado de homologación de los equipos de rayos X existentes en la instalación
- Certificado expedido por un Servicio o Unidad Técnica de Protección contra las Radiaciones Ionizantes, que asegure la conformidad del Proyecto de la Instalación, con las especificaciones técnicas aplicables, y que verifique que la construcción y montaje de la instalación se ha realizado de acuerdo con el proyecto citado.
- Garantía de cobertura de riesgos para instalaciones radiactivas de 3ª Categoría.

Si la Dirección Provincial considera que la documentación presentada fuera incompleta o inexacta, comunicará esta circunstancia al titular en el plazo de tres meses, a fin que en un intervalo de 10 días se subsanen las deficiencias aparecidas. Transcurrido este período sin que el titular haya procedido a la rectificación solicitada, se le comunicará que la declaración propuesta no es válida y en consecuencia no se procederá a su inscripción en el Registro de Instalaciones de Radiodiagnóstico Médico.

Las declaraciones realizadas siguiendo correctamente la normativa descrita, se inscribirán en un Registro de Instalaciones de rayos X con fines de Diagnóstico Médico. La Dirección Provincial remitirá copia de las declaraciones al Consejo de Seguridad Nuclear para que compruebe cuanto estime necesario, tanto las especificaciones técnicas, como otras características pertinentes.

El cese de la utilización de Instalaciones de Radiodiagnóstico Médico, así como la ampliación o disminución del número de equipos de rayos X y en general cualquier modificación que afecte sustancialmente al proyecto o condiciones de funcionamiento inicialmente declaradas, exigirá un trámite de Declaración y Registro similar al establecido en la Declaración inicial.

### **Personal**

El funcionamiento de una Instalación de rayos X con fines de diagnóstico médico deberá ser dirigido por Médicos, Odontólogos, Veterinarios o Podólogos que posean tanto los conocimientos adecuados sobre el diseño y uso de los equipos y sobre el riesgo radiológico asociado y medios de seguridad y protección radiológica que deban adoptarse, como adiestramiento y experiencia en estos ámbitos.

Cuando la operación de los equipos de rayos X no deba realizarse directamente por el titulado que dirige el funcionamiento de la instalación, sino por personal bajo su supervisión, éste deberá estar igualmente capacitado al efecto.

Los titulados que dirijan el funcionamiento de las instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico y los operadores de equipos que actúen bajo su supervisión, deberán cumplir un cierto número de requisitos que se describirán al tratar sobre la Resolución del Consejo de Seguridad Nuclear, B.O.E. 274 del 14/11/92 por la que se establece la normativa a que habrá de sujetarse la homologación de cursos y programas que habiliten para los cometidos citados, y la acreditación directa del personal que ejerza dichas funciones.



El Consejo de Seguridad Nuclear queda facultado para comprobar cuando las circunstancias lo aconsejen, mediante la superación de pruebas que él mismo establezca, la permanente puesta al día de los conocimientos en materia de Protección Radiológica que debe poseer el personal que dirija el funcionamiento de las instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico, así como el que opere los equipos existentes en la misma.

## **Infracciones**

Las infracciones a lo establecido en el presente Real Decreto tendrán la consideración de leves, graves y muy graves, que se sancionarán con multas cuya cuantía dependerá de la naturaleza de la infracción. Cuando la calificación se califique como muy grave, podrá imponerse conjuntamente la suspensión temporal o definitiva de las actividades de la instalación. La reincidencia de la infracción podrá dar lugar a que se dupliquen las multas.

Con independencia del régimen sancionador descrito, el Consejo de Seguridad Nuclear podrá suspender por razones de seguridad el funcionamiento de instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico.

## **Disposiciones transitorias.**

- El titular de las instalaciones de rayos X que a la entrada en vigor del Real Decreto cuenten con la autorización de Puesta en Marcha obtenida de conformidad con lo establecido en el Reglamento de Instalaciones Radiactivas estará exento de la obligación de declarar su utilización. Estas instalaciones serán inscritas de oficio en el registro citado anteriormente.
- Lo establecido en la disposición transitoria primera será de aplicación también a las instalaciones de rayos X para las que se hubiera solicitado autorización de Puesta en Marcha sin que a la fecha de entrada en vigor del Real Decreto les hubiera sido concedida.
- Queda acreditada la capacidad para dirigir el funcionamiento de las instalaciones de rayos X para operar en los equipos existentes en las mismas a quienes a la entrada en vigor del Real Decreto estén en posesión de una licencia de Supervisor u Operador para este tipo de Instalaciones.
- La declaración de utilización de las instalaciones para su inscripción registral se realizará en el plazo máximo de 2 años a partir de la fecha de publicación del Real Decreto.

- Este plazo fue ampliado posteriormente a otros dos años.
- La documentación a presentar será la citada en 15.4.3 a excepción del Certificado de Conformidad del Proyecto de la Instalación, que se sustituirá por un Certificado expedido por un Servicio o Unidad Técnica de Protección contra las Radiaciones Ionizantes acreditando que la Instalación cumple las especificaciones técnicas de las Salas de Radiodiagnóstico.
- Cuando no sea posible la presentación de los Certificados de Homologación de los equipos, se presentará un Certificado expedido por una Empresa o Entidad autorizada al efecto, que acredite que los equipos han sido verificados y no presentan riesgo indebido de irradiación externa para el personal profesionalmente expuesto y los miembros del público.
- El personal que sin estar en posesión de la licencia de Operador o Supervisor a la entrada en vigor de este Real Decreto, esté dirigiendo el funcionamiento de las Instalaciones de rayos X con fines de Diagnóstico Médico y operando en los equipos existentes en las mismas, deberá obtener la acreditación para dirigir el funcionamiento de Instalaciones de Radiodiagnóstico o para operar en dichas Instalaciones, según se describe en la Resolución del Consejo de Seguridad Nuclear, B.O.E. 274 de 14/11/92.

### **Especificaciones técnicas para la utilización de las instalaciones**

- Se establecerán unas normas de actuación para la utilización de la instalación, de modo que las dosis equivalentes de radiación que puedan recibir las personas profesionalmente expuestas sean tan pequeñas como razonablemente sea posible. Estas normas, deberán estar escritas y ser conocidas y cumplidas por todo el personal de la instalación. Igualmente se dará cumplimiento a lo establecido en el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.
- Deberá llevarse un diario de Operación, donde se anotará cualquier tipo de incidente registrado en la instalación, las fechas de las revisiones de los equipos y los valores de los niveles de radiación medidos, registrándose asimismo, el tiempo real de utilización de cada aparato, y el personal que dirige su funcionamiento.
- Un resumen de todo ello figurará en un informe anual que el titular deberá remitir al Consejo de Seguridad Nuclear dentro del primer trimestre del año natural.

- Para dirigir el funcionamiento de la Instalación así como operar los equipos de rayos X, deberá existir personal acreditado al efecto por el Consejo de Seguridad Nuclear.
- El Titular de la Instalación solicitará de una entidad autorizada por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo o de un Servicio o Unidad Técnica de Protección contra las Radiaciones Ionizantes, propia o contratada, que efectúe el control de calidad de los equipos y la vigilancia de los niveles de radiación. en los puestos de trabajo, como mínimo anualmente, y siempre que se modifiquen las condiciones habituales de trabajo o se detecte alguna irregularidad que afecte a la protección radiológica.
- En todo momento, se dispondrá de los documentos oportunos que acrediten la seguridad en el diseño y fabricación de los generadores y tubos de rayos X, tales como: certificado de homologación de los equipos, o en su lugar, certificado de verificación emitido de conformidad con lo preceptuado
- De conformidad con lo previsto en el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes, se llevará el control médico y dosimétrico del personal profesionalmente expuesto en la Instalación, y se tendrán actualizados los historiales médicos y dosimétricos correspondientes. Dicho control dosimétrico se efectuará mediante el empleo de dosímetros de termoluminiscencia o de película fotográfica y la lectura de los dosímetros la deberá hacer un centro autorizado.
- Siempre que por las características propias de una exploración se haga necesaria la inmovilización del paciente, ésta se realizará mediante la utilización de sujeciones mecánicas apropiadas. Si esto no fuera posible y la inmovilización se realizase por una o varias personas, éstas serán a juicio del facultativo, personal profesionalmente expuesto de la instalación en turnos rotatorios. En ningún caso se encontrarán entre ellas mujeres gestantes ni menores de 18 años. Todas las personas que intervengan en la inmovilización, estarán siempre en el menor número posible, procurarán en todo momento no quedar expuestos al haz directo, y deberán ir provistos de guantes y delantal plomado, para lo cual estas prendas de protección deberán estar disponibles en la instalación en número suficiente para permitir su uso simultáneo.
- En las salas donde estén ubicados los equipos de rayos X se deberán tomar las medidas oportunas para que dispongan de un acceso controlado de modo que no permanecerá ninguna persona ajena a las

mencionadas salas cuando los equipos de rayos X estén en funcionamiento. Asimismo, dichos equipos, cuando estén fuera de funcionamiento, deberán permanecer en condiciones de seguridad, de modo que no puedan ser puestos en marcha ni manipulados por personal ajeno a la instalación.

- En las salas en las que se operen los equipos de rayos X a pie de tubo, deberán usar delantales plomados todas las personas que permanezcan en la sala durante el acto médico y evitarán el haz directo de la radiación.
- Han de disponer de cortinillas plomadas todos los equipos que efectúen radioscopia y se opere a pie de tubo.
- En todas las Instalaciones de Radiodiagnóstico, se dispondrá de las prendas plomadas adecuadas para proteger tanto al paciente como al personal profesionalmente expuesto (protectores gonadales, delantales plomados, etc.).
- Los equipos de rayos X para efectuar radioscopia deberán poseer intensificador de imagen salvo en circunstancias excepcionalmente apreciadas favorablemente por el Consejo de Seguridad Nuclear.
- La retirada de los equipos de rayos X defectuosos se efectuará por las empresas o entidades autorizadas por el Ministerio de Industria y Energía, las cuales procederán a la inutilización de los tubos.

**Resolución de 5 de noviembre de 1.992, del Consejo de Seguridad Nuclear, por la que se establecen las normas a que habrán de sujetarse la homologación de cursos o programas que habiliten para la dirección y operación de rayos X con fines diagnósticos, y la acreditación directa del personal que ejerza dichas funciones.**

La presente Resolución expone la normativa para que el personal que dirija u opere aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico pueda acreditar ante el Consejo de Seguridad Nuclear los conocimientos, adiestramiento y experiencia precisos, bien mediante la superación de cursos, bien directamente por medio de la pertinente documentación justificativa.

15.9.1.- A todos efectos previstos en el artículo 14 del Real Decreto 1891/1991, quedan homologados los cursos de adiestramiento de Supervisores y Operadores de Instalaciones de Radiodiagnóstico General y Radiología Dental autorizados por el Consejo de Seguridad Nuclear con anterioridad a la entrada en vigor de esta Resolución. Los poseedores de

diplomas o certificados de adiestramiento que hayan sido expedidos con la aprobación de dichos cursos, solicitarán al Consejo de Seguridad Nuclear que se extienda diligencia en los referidos diplomas o certificados por la que se hará constar tanto la fecha de la autorización oficial del curso como que la capacitación se concede bien para dirigir o bien para operar las instalaciones de rayos X con fines diagnósticos.

### **15.9.2.- Homologación mediante curso**

El acceso a la homologación podrá hacerse mediante cursos específicos impartidos por entidades o instituciones acreditadas por el Consejo de Seguridad Nuclear.

El personal que vaya a recibir los cursos objeto de la homologación habrá de reunir los siguientes requisitos de titulación que habrán de ser acreditados documentalmente.

**a.-** Cursos que una vez homologados, acrediten para dirigir el funcionamiento de las instalaciones de rayos X con fines diagnósticos. Licenciatura en Medicina y Cirugía, Odontología, Veterinaria o Podología.

**b.-** Cursos que capaciten para operar los mismos equipos bajo la supervisión de los titulados del apartado anterior: bachiller, formación profesional de segundo grado o equivalente.

Los alumnos de estos cursos que superen las pruebas de suficiencia, recibirán un diploma que los capacita para dirigir u operar las instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico.

### **15.9.3.- Homologación por Curriculum**

Los licenciados en Medicina y Cirugía, Odontología o Veterinaria y los Podólogos que cuenten como mínimo con cinco años de ejercicio profesional y acrediten al mismo tiempo haber realizado cursos de especialización sobre las materias relacionadas en el anexo, podrán solicitar al Consejo de Seguridad Nuclear la acreditación para dirigir el funcionamiento de las instalaciones de rayos X con fines diagnósticos. El solicitante indicará, en su caso, el tipo y características de la instalación en que desarrolle sus actividades.

En los mismos términos del párrafo anterior podrán solicitar acreditación para operar dichas instalaciones los Diplomados Universitarios de Enfermería.

La solicitud de acreditación basada en el correspondiente título académico que se contempla en el apartado anterior deberá ir acompañada de la documentación justificativa del período de ejercicio profesional y de los cursos de especialización a que se hace referencia en el mismo. El Consejo de Seguridad Nuclear apreciará la acreditación de ambas circunstancias a las condiciones mínimas de acreditación.

Los Licenciados en Medicina y Cirugía especialistas en electrorradiología, Medicina Nuclear, Radiodiagnóstico u Oncología Radioterapéutica podrán solicitar al Consejo de Seguridad Nuclear la acreditación para dirigir el funcionamiento de las instalaciones de rayos X con fines diagnósticos, para lo que se acompañará una copia compulsada del título de la especialidad o certificación acreditativa del mismo, expedidos por el Ministerio de Educación y Ciencia.

Los técnicos especialistas en Radiodiagnóstico, Medicina Nuclear o Radioterapia podrán asimismo solicitar al Consejo de Seguridad Nuclear la acreditación para operar las instalaciones de rayos X con fines diagnósticos, para lo que acompañarán del mismo modo fotocopia compulsada del título de técnico especialista o certificación acreditativa del mismo, expedidos por el Ministerio de Educación y Ciencia.

## **LEGISLACIÓN COMUNITARIA**

### **Introducción**

La adhesión de España a Europa, supuso nuestra incorporación a la Comunidad Económica Europea (CEE), a la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA) y a la Comunidad Europea de Energía Atómica (CEEAA), que son las tres comunidades constituidas. Por tanto, España pasó a ser parte de los Tratados consecutivos de estas tres Comunidades aceptando estos sin reservas.

La adhesión de España implica el reconocimiento del carácter vinculante del Derecho Comunitario y de los procedimientos existentes para asegurar la uniformidad de interpretación del mismo.

Se hace, pues, necesario desde el punto de vista de la Protección Radiológica conocer y asimilar el alcance de la adhesión española a la Comunidad Europea de la Energía Atómica, en particular. Por ello, a continuación se tratará de destacar los aspectos fundamentales del Tratado

constitutivo de dicha Comunidad y se comentará la Legislación Nuclear Comunitaria aplicable en España.

La Comunidad Europea de Energía Atómica (EURATOM).- Constituida en 1.957 por los Tratados de Roma, surgió como un intento de los seis países que la constituían, (Alemania, Bélgica, Francia, Holanda, Italia y Luxemburgo), para satisfacer la escasez de recursos energéticos que entonces se preveía. A los seis países constituyentes de este Organismo, se adhirieron más tarde, Dinamarca, El Reino Unido e Irlanda, Grecia, Portugal y España, y últimamente Suecia, Austria y Finlandia, que forman los quince Estados que actualmente la constituyen.

Cabe destacar, como característica importante del EURATOM, su facultad reglamentaria, lo que constituye un fuero de normativa legal y técnica cuyo nivel de cumplimiento y alcance es el siguiente:

- a.-** Los Reglamentos, tienen un alcance general. Son obligatorios en todos sus elementos y directamente aplicables en cada Estado.
- b.-** Las Directivas, obligan al Estado miembro en cuanto al resultado previsto, dejando a las autoridades nacionales la elección de la forma y los medios para alcanzarlo.
- c.-** Las Decisiones, son obligatorias en todos sus elementos para todos sus destinatarios.
- d.-** Las Recomendaciones y los Dictámenes no son de obligado cumplimiento.

Normas básicas de Protección Sanitaria de la Población y los Trabajadores Expuestos.- Publicadas por el Euratom en 1980 y 1984, las directivas sobre las últimas revisiones de las normas básicas de protección sanitaria de la población y los trabajadores expuestos, como respuesta al apartado anterior.

Estas normativas contienen las definiciones de los conceptos unidades y términos utilizados en Protección Radiológica, el régimen de declaración y autorización de las actividades, la limitación de dosis, los límites derivados, las exposiciones accidentales, etc., que están recogidas en nuestra Reglamentación.

Protección Radiológica de personas sometidas a exámenes médicos.- En 1.984, aparece la Directiva 84/466/Euratom por el que se establecen las medidas fundamentales relativas a la Protección Radiológica de las personas sometidas a exámenes y tratamientos médicos. En esta Directiva cabe destacar lo siguiente:

**a.-** Toda aplicación de las Radiaciones Ionizantes en Medicina debe ser efectuada bajo la responsabilidad de profesionales capacitados por ello y con una formación adecuada en el campo de la Protección Radiológica, formación que, a otro nivel, también se requiere para el personal auxiliar.

**b.-** Se limitarán a circunstancias excepcionales, los exámenes radioscópicos directos.

**c.-** Se debe disponer de un especialista cualificado en radiofísica que podrá ser destinado a las instalaciones de radioterapia y medicina nuclear.

**d.-** Se dan una serie de recomendaciones prácticas sobre la forma de operar con el paciente.

NO COPIAR